

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra informatiky

Návrh a simulace bezvláknového optického spoje s použitím vlnového multiplexu

Design and Simulation Free Space Optic Communication Using Wavelength Division Multiplexing

Zadání bakalářské práce

Student:

Lukáš Stromský

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

Návrh a simulace bezvláknového optického spoje s použitím vlnového multiplexu

Design and Simulation Free Space Optic Communication Using
Wavelength Division Multiplexing

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Cílem bakalářské práce je simulace chování bezvláknového optického spoje, v závislosti na provozních podmínkách. Bezvláknový optický spoj bude založen na technologii WDM.

1. Studium a popis atmosférických komunikací a atmosférických jevů.
2. Popis technologie WDM.
3. Návrh WDM bezvláknového optického spoje v prostředí OptiSystem.
4. Simulace vlivu atmosférických jevů na WDM bezvláknový optický spoj.
5. Vyhodnocení naměřených dat ze simulací.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] LAMBERT, S. G., CASEY W. L. *Laser communications in space*. Boston: Artech House, 1995. ISBN 0890067228.
- [2] ANDREWS, L. C., PHILLIPS R. L. *Laser beam propagation through random media*. Bellingham, Wash: SPIE Press, 2005. ISBN 0819459488.
- [3] SALEH, B. E., TEICH M. C. *Základy fotoniky*. Praha: Matfyzpress, 1996. ISBN 80-85863-12-x.
- [4] GHASSEMLOOY, Z., POPOOLA W., RAJBHANDARI S. *Optical wireless communications: system and channel modelling with MATLAB*. Boca Raton: CRC Press, 2012. ISBN 978-1-4398-5188-3.
- [5] ZHENG, J., MOUFTAH H. T. *Optical WDM Networks: Concepts and Design Principles*. John Wiley & Sons, 2004. ISBN 978-0-471-67170-1.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Aleš Vanderka**

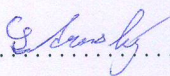
Datum odevzdání: 29.04.2016



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

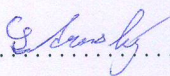
Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v magisterských programech VŠB-TU Ostrava.

V Ostravě 28. dubna 2016



Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v magisterských programech VŠB-TU Ostrava.

V Ostravě 28. dubna 2016



Rád bych na tomto místě poděkovala všem, kteří mi s prací pomohli, především panu Ing. Aleši Vanderkovi za odborné rady a konzultace.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá kvalitou optického signálu při použití technologie vlnového multiplexu v bezdrátovém optickém systému. V úvodu se práce věnuje popisem atmosferického přenosového prostředí, které má vliv na funkci bezdrátového optického systému. Následně popisuje fungování vlnového multiplexu v optickém telekomunikačním systému. Dále se tato práce zabývá návrhem OBS s použitím WDM technologie v prostředí OptiSystem. Simulace se týkala změny BER v závislosti na počasí, tedy útlumu nebo turbulenci na trase. Součástí této práce je také vyhodnocení nasimulovaných dat, které jsou následně vyneseny do grafu.

Klíčová slova: Optický bezdrátový spoj, atmosférické přenosové prostředí, rozptyl, útlum, turbulence, vlnový multiplex, bitová chybovost, OptiSystem

Abstract

This thesis deals with the quality of the optical signal using wavelength division multiplexing technology in wireless optical system. At the beginning of the work deals with the description of the atmospheric transmission environment, which affect the function of a wireless optical system. Further describes the operation of wavelength division multiplexing in an optical telecommunications system. Furthermore, this work deals with the design OBS using WDM technology environment OptiSystem. Simulation concerned the BER changes according to the weather, a attenuation or turbulence along the route. Part of this work is to evaluate the simulated data, which are then plotted on a graph.

Key Words: Free space optic, atmospheric transmission environment, scattering, attenuation, turbulence, wavelength multiplex, bit error rate, OptiSystem

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	10
Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	13
1 Úvod	14
2 Atmosférické komunikační prostředí	15
2.1 Zemská atmosféra	15
2.2 Atmosferické jevy	15
2.3 Atmosferické faktory	21
3 Bezdrátové optické komunikace	23
3.1 Historie	23
3.2 Optický atmosferický spoj	23
3.3 Výhody bezvláknové optiky	25
3.4 Nevýhody bezvláknové optiky	25
3.5 Zdroje záření	25
3.6 Fotodetektory přijímače	26
4 Vlnově dělený multiplex	28
4.1 CWDM	29
4.2 DWDM	30
5 Kvalitativní parametry	31
5.1 BER	31
5.2 Q-factor	31
5.3 Eye diagram	32
6 Návrh WDM FSO spoje	33
6.1 Vysílací část	34
6.2 Příjímací část	36
6.3 Přenosová část	39
7 Vyhodnocení nasimulovaných dat	40
7.1 Vyhodnocení pro modulaci Non-Return-to-Zero	40
7.2 Vyhodnocení pro modulaci Retrun-to-Zero	41
7.3 Vyhodnocení pro modulaci QAM	43

7.4	Vyhodnocení pro modulaci BPSK	44
7.5	Porovnání modulací	46
Závěr		50
Literatura		51
Přílohy		52
A Přílohy		53

Seznam použitých zkratk a symbolů

APD	– Avalanche photodiode
BER	– Bit Error Rate
BPSK	– Binary phase shift keying
CW	– Continuous wave
CWDM	– Corsae wavelength division multiplexing
DEMUX	– Demultiplexed
DWDM	– Dense wavelength divison multiplexing
FSO	– Free Space Optic
IR	– Infrared
MUX	– Multiplexer
NRZ	– Non-Return-Zero
OBS	– Optický bezdrátový spoj
OOK	– On-Off Keying
PRBS	– Pseudo random bits sequence
QAM	– Qadrature amplitude modulation
RZ	– Return-Zero
SNR	– Signal to Nois Ratio
UDWDM	– Ultra dense wavelength divison multiplexing
VŠB-TUO	– Vysoká škola Bánska-Technická univerzita Ostrava
WDM	– Wavelength Division Multiplexing

Seznam obrázků

1	Molekulová atmosférická absorpce.	16
2	Rayleighův rozptyl.	17
3	Mieův rozptyl na menší molekule.	18
4	Mieův rozptyl na větší molekule.	18
5	Atmosférický kanál s turbulentními víry.	20
6	Mezinárodní tabulka viditelnosti a útlumu.	22
7	Princip Bellova "Photophonu".	23
8	Příklad OBS komunikační sítě.	24
9	Rozdíl spektrální šířky LED a laseru.	26
10	Přenosové spektrum optického vlákna.	28
11	Blokový diagram WDM přenosového kanálu.	29
12	Kanály CWDM definované dle ITU-T G.694.2.	29
13	Diagram oka.	32
14	Mapa trasy FSO spoje.	33
15	Vygenerovaný náhodný NRZ signál na prvním kanálu.	34
16	Vysílací část jednoho kanálu.	35
17	Optické spektrum.	36
18	Diagramy oka jednotlivých modulací a)NRZ, b)RZ, c)QAM, d)BPSK.	37
19	Celá přijímací část	38
20	Zobrazení vysílaného signálu pro přenos FSO systémem	38
21	Zobrazení přijmaného signálu po přenosu FSO systémem	38
22	Schéma přenosové části FSO spoje.	39
23	Graf závislosti BER na změně útlumu za použití NRZ modulace.	40
24	Graf závislosti BER na změně $C_n^2 [m^{-\frac{2}{3}}]$ při modulaci NRZ.	41
25	Graf závislosti BER na změně útlumu za použití RZ modulace.	42
26	Graf závislosti BER na změně $C_n^2 [m^{-\frac{2}{3}}]$ při modulaci RZ.	42
27	Graf závislosti BER na změně útlumu za použití QAM modulace.	43
28	Graf závislosti BER na změně $C_n^2 [m^{-\frac{2}{3}}]$ při QAM modulaci.	44
29	Graf závislosti BER na změně útlumu za použití BPSK modulace.	45
30	Graf závislosti BER na změně $C_n^2 [m^{-\frac{2}{3}}]$ při BPSK modulaci.	45
31	Porovnání modulací za použití jedné linky, závislosti BER na změně útlumu.	46
32	Porovnání modulací s 8 vlnovým multiplexem, závislosti BER na změně útlumu.	47
33	Porovnání modulací za použití jedné linky, závislosti BER na změně $C_n^2 [m^{-\frac{2}{3}}]$	47
34	Porovnání modulací 8 vlnového multiplexu, závislosti BER na změně $C_n^2 [m^{-\frac{2}{3}}]$	48
35	Graf srovnání všech modulací při změně útlumu na trase.	48
36	Graf srovnání všech modulací při změně strukturního indexu lomu $C_n^2 [m^{-\frac{2}{3}}]$	49
37	Schéma celého zapojení FSO spoje s použitím osmi linek a modulaci NRZ.	53

38	Schéma celého zapojení FSO spoje s použitím osmi linek a modulaci RZ.	54
39	Schéma celého zapojení FSO spoje s použitím osmi linek a modulace QAM. . . .	55
40	Schéma celého zapojení FSO spoje s použitím osmi linek a modulace BPSK. . . .	56

1 Úvod

Bakalářská práce se zabývá technologií pro přenos dat pomocí optické komunikace. V dnešní době jsou optické komunikace velmi rozšířenou technologií, a to díky velkým přenosovým rychlostem. Další výhodou je odolnost proti elektromagnetickému rušení. Toto jsou hlavní výhody vláknové optiky, nicméně je lze využít i pro bezvláknovou optiku. Touto technologií můžeme nahradit dnešní nejrozšířenější WiFi systémy.

Avšak i tato technologie má své nevýhody. Nasazení této technologie do atmosféry je složité, z důvodu atmosferických jevů jako jsou absorpce mezi které patří různé částice na molekulové úrovni, například voda nebo oxid uhličitý. Dále rozptyl, který zapříčiňuje úhlové rozprostření světla, a turbulentní víry způsobující změnu strukturního indexu lomu. Dalším problémem je stále měnící se počasí, kde nejhorší faktor je mlha, která způsobuje vysoký útlum. Může dokonce zapříčinit ztrátu viditelnosti mezi hlavicemi spoje, a tím dojde k rozpadu spojení. Velkým problémem jsou také turbulence, které způsobují změnu indexu lomu podél přenosové trasy, tím snižují kvalitu spojení. Detailnějšímu popisu těchto atmosferických jevů a faktorů se věnuje úvod této práce.

Vlnový multiplex představuje v optických komunikacích technologii, která multiplexuje optické signály z více linek s použitím odlišných vlnových délek. Tím dosáhneme větší přenosové kapacity. Dále bylo v praktické části práce nasimulováno nasazení WDM technologie do OBS systému. Tento návrh simulace byl uskutečněn v prostředí OptiSystem od společnosti OptiWave.

V simulaci byly vyzkoušeny návrhy schémat při použití modulací NRZ, RZ, QAM nebo BPSK. Hodnoty použité v návrhu, se podobají těm, které jsou nastaveny a používány na OBS, který je vytvořen ve školním areálu VŠB-TUO. V prvním případě simulací je testován vliv změny počasí, tudíž útlumu v atmosféře na chybovosti BER, v tom druhém vliv turbulence na tento návrh. Závěr této práce je zaměřen na vyhodnocení naměřených a nasimulovaných výsledků.

2 Atmosférické komunikační prostředí

Atmosferické komunikační prostředí je velmi složité a dynamické. Atmosféra je velmi náchylné přenosové médium pro charakteristické šíření optického paprsku, což má za následek optické ztráty a fázové kolísání. Nejvíce na optický svazek působí atmosférické jevy jako absorpce, rozptyl a turbulence.

2.1 Zemská atmosféra

Pro FSO spoje, je přenosové médium atmosféra. Ta může být považována jako série soustředěných vrstev plynu kolem Země. Od 0 až po 80–90 km nadmořské výšky se objevují tři sféry: troposféra, stratosféra a mezosféra. Tyto vrstvy jsou odlišeny jejich teplotními změnami s ohledem na nadmořskou výšku. V FSO telekomunikacích nás zajímá hlavně o troposféru, protože je to místo, kde dochází k většině klimatických jevů. Šíření světla v troposféře je ovlivněno :[2]

- Složení plynů atmosféry
- Přítomností aerosolů–malé částice o různé velikosti od 0,1–100 μm
- Přítomností deště, sněhu, nebo krupobití
- Přítomností prachových částic jako je kouř, písek nebo prach
- Změnou gradování indexu lomu vzduchu, což má za důsledek scintilace a turbulence

2.2 Atmosferické jevy

Absorpce a rozptyl světla jsou způsobeny částicemi v atmosféře. Tento složitý proces popisuje Mieův rozptyl , který říká jaké bude chování těchto větších částic, jako je například mlha nebo déšť. Naopak Rayleighův rozptyl popisuje chování menších částic. Tyto faktory ovlivňují v atmosférickém prostředí výkon FSO systému. Je vhodné brát tyto faktory v potaz, a počítat s nimi už při návrhu daného systému, aby jsme dosáhli co nejoptimálnějšího výkonu.

2.2.1 Absorpce

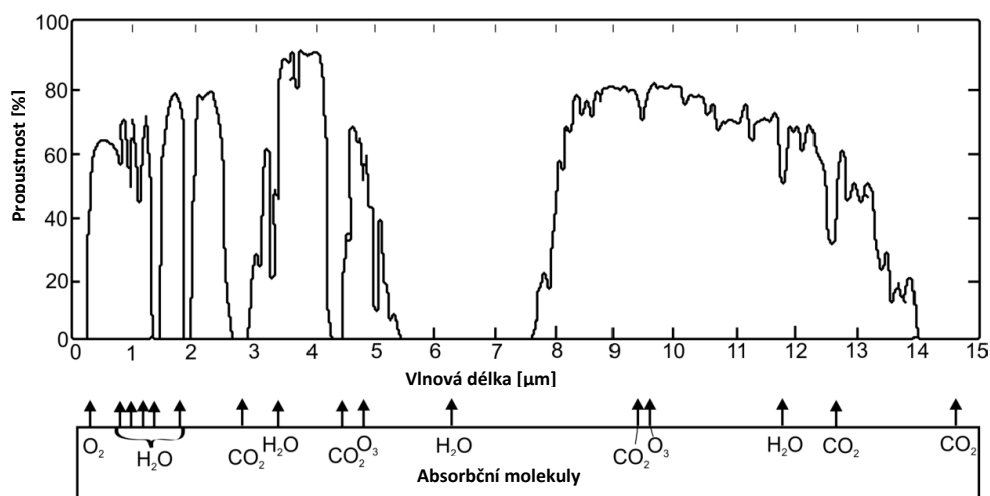
Tento jev nastává v momentě, kdy dojde k interakci mezi šířícími se fotony a molekulami v cestě atmosférickým prostředím. Atomy a molekuly jsou popisovány jejich indexem refrakce. Imaginární část indexu refrakce k , souvisí s absorpčním koeficientem α . Absorpční koeficient lze vypočítat vzorcem:

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} = \sigma_a N_a, \quad (1)$$

kde σ_a je absorpční průřez a N_a je koncentrace absorbujících částic.

Absorpční koeficient je tedy funkcí síly daného druhu částice. Absorpce je závislá na vlnové délce, to vede k transparentní zóně atmosféry (rozsah vlnových délek s minimální absorpcí).

Na Obr. 1 je zobrazena molekulová absorpce pro atmosferické přenosové okno. Toto okno je nejvíce používané pro FSO systémy. Infračervené oblasti, v nichž nejčastěji absorbují částice



Typ	Poloměr [μm]	Velikost parametru x_0	Typ rozptylu
Vzdušné molekuly	0,0001	0,00074	Rayleighův
Lehká mlha	0,01–1	0,074–7,4	Rayleighův–Mieův
Mlha	1–20	7,4–147,8	Mieův–Geometrický
Děšť	100–10 000	740–74 000	Geometrický
Sníh	1 000–5 000	7 400–37 000	Geometrický
Kroupy	5 000–50 000	37 000–370 000	Geometrický

Tabulka 1: Typický atmosférický rozptyl částic.

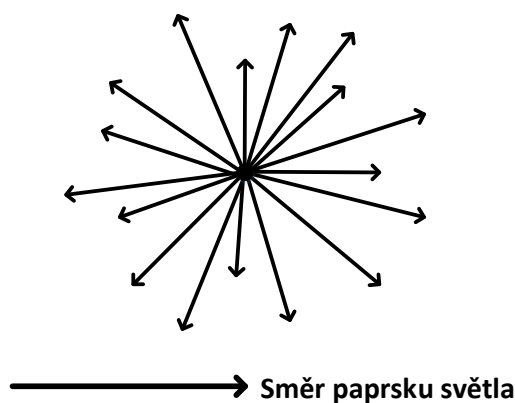
představují výrazně menší překážku světelnému paprsku. Typický atmosférický rozptyl částic je zobrazen v Tab. 1.[1]

2.2.2.1 Rayleighův rozptyl Tento rozptyl můžeme pozorovat na molekulách vzduchu, které jsou mnohem menší než vlnová délka světla procházející skrz ně. Například krátké vlnové délky (modré) jsou rozptýleny více, než delší vlnové délky (červené). Toto je důsledkem toho, že nebe má během dne modré zbarvení, jelikož to co vidíme je rozptyl světla atmosférických molekul. Při západu slunce jej vidíme červeně.

Zjednodušený výraz popisující Rayleighův rozptyl je dán vztahem

$$\beta_{Rayleigh}(\lambda) = 0,827 N_p A_p^3 \lambda^{-4}, \quad (3)$$

kde N_p je počet částic na jednotku objemu šířící se po dráze a A_p představuje průřez rozptylu. Rayleighův rozptyl vidíme na Obr. 2.[1]

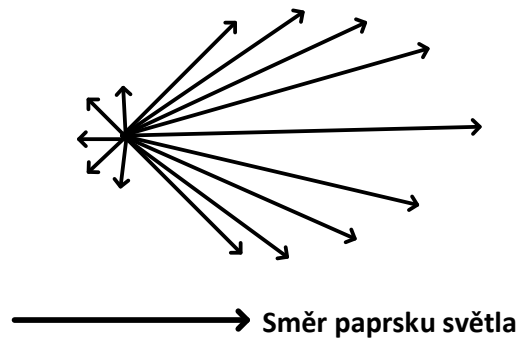


Obrázek 2: Rayleighův rozptyl.

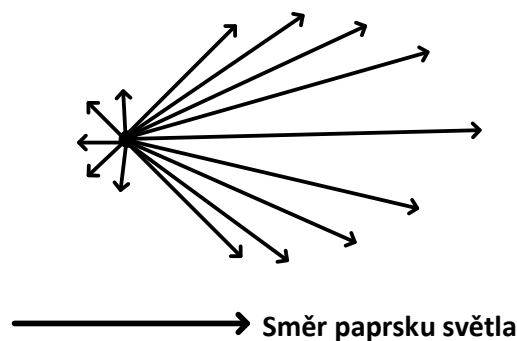
2.2.2.2 Mieův rozptyl K Mieovu rozptylu dochází, když velikost částic je srovnatelná s velikostí světelného paprsku a jeho vlnové délce. Od jednotek mikrometrů, až k několika desítkám. V atmosféře, se aerosoly liší v distribuci, tvaru a koncentraci profilu, a to má za následek interakci s šířením optického svazku. Hlavním parametrem v Mieově teorii je bezrozměrný parametr x :

$$x = \frac{2\pi r}{\lambda}, \quad (4)$$

kde r je poloměr částice a λ je vlnová délka optického svazku. Mieův rozptyl na menší a větší molekule můžeme vidět na následujících Obr. 3 a 4.[1]



Obrázek 3: Mieův rozptyl na menší molekule.



Obrázek 4: Mieův rozptyl na větší molekule.

2.2.2.3 Geometrický rozptyl Tento rozptyl nastane, když částice v atmosféře jsou o několik řádů větší, než je vlnová délka. V bezvláknových systémech se jedná o částice velikosti několika mm. Mezi ně patří například různé soli, písek, prach, sníh apod.[8]

2.2.3 Scintilace

Atmosférickou scintilaci můžeme definovat jako jev, kdy nastane změna intenzity světla v čase a prostoru. Scintilaci nalezneme v rovině přijmače detekujícího optický signál. Atmosféra je směs různých plynů a částic, která nepřetžitě získává nebo ztrácí energii. Existují buňky, které se zahřívají více než ostatní, a jiné buňky jsou zase více chlazeny. Výsledkem jsou termální cely ve vzduchových buňkách, které jsou charakterizovány nehomogenitou, dynamicky se měnícím indexem lomu, hustotou a soudržností vzduchu. K největším scintilacím dochází při maximálních teplotách přes den, nejčastěji kolem poledne. Nejvíce náchylné FSO systémy jsou ty, které jsou horizontálně nejbližší k zemskému povrchu. Hodnoty scintilace jsou použity pro počítání SNR hodnot, ze kterých je dále počítána chybovost BER.[9]

2.2.4 Turbulence

Jako ideální místo pro použití FSO systému se může jevit poušť, jelikož se na poušti vyskytuje minimální množství aerosolů. To by byla pravda, kdyby byl důležitý jen útlum atmosféry, ale v horkém a suchém podnebí mohou turbulence způsobit problémy s přenosem. Jak se zemský povrch na slunci ohřívá, tak se ohřívá také vzduch. Některé části vzduchu se ohřívají více než ostatní, což má za následek změnu indexu lomu prostředí. To způsobí změnu trasy po které se světlo přenáší. Jelikož tyto vzduchové cely nejsou stabilní jak v prostoru, tak v čase, bude změna indexu lomu jako náhodný pohyb.

Na laserové paprsky působí tři účinky způsobené turbulentí.

- První účinek – paprsek může být vychýlen náhodně přes měnící se index lomu prostředí. Jedná se o jev známý jako zbloudilý paprsek. Když se lom světla chová v prostředí jako je vzduch podobně, jako když světlo prochází různými prostředími, světlo může být náhodně soustředěné nebo rozptýlené podle změn indexu lomu podél přenosové cesty.

- Druhý účinek – fáze paprsku se může lišit, je to způsobeno kolísáním intenzity nebo chvěním vzduchu(scintilace).

- Třetí účinek – paprsek se může šířit déle, než předpovídá difrakční teorie.

Míra turbulence je udávána strukturním parametrem indexu lomu C_n^2 . Protože vzduch potřebuje čas na ohřátí, jsou turbulence největší po poledni, kolem poledne ($C_n^2 = 10^{-13} m^{-2/3}$) a nejmenší po východu a západu slunce ($C_n^2 = 10^{-17} m^{-2/3}$). Hodnoty C_n^2 jsou obvykle největší blízko země a klesají s narůstající nadmořskou výškou. Pokud chceme minimalizovat účinek scintilace pro přenos, tak by FSO systémy neměly být instalovány v blízkosti horkých povrchů. Pro instalaci FSO systému nejsou vhodné dehtové střechy, na kterých může vznikat velké množství scintilací

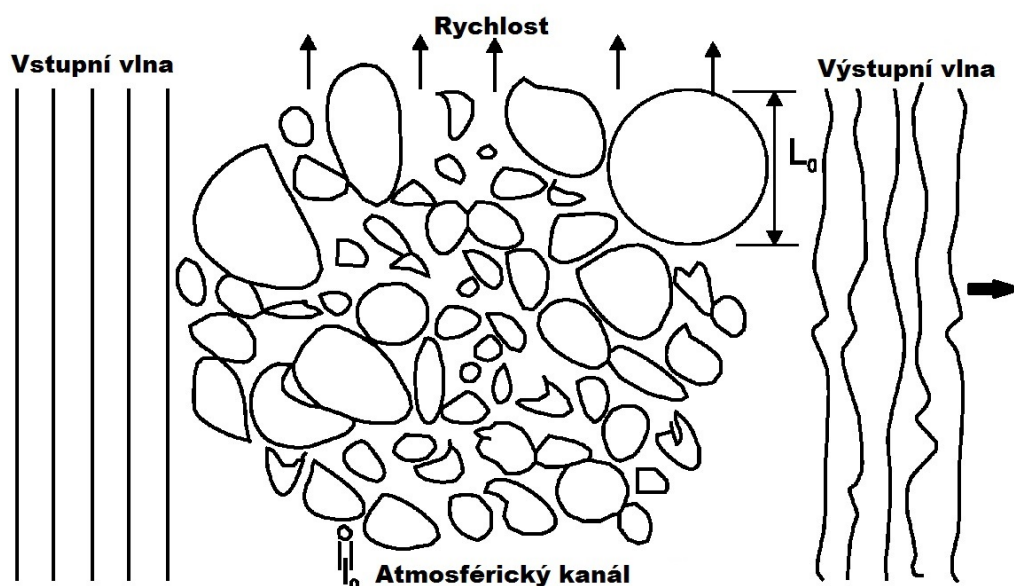
v horkých letních dnech. Vzhledem k tomu, že scintilace klesá s nadmořskou výškou, doporučuje se instalovat FSO systémy výše než 1 m nad střechu .[3]

Nejmenší resp. největší turbulentní víry jsou označovány jako vnitřní míra l_0 , resp. vnější míra L_0 turbulence. Pro l_0 a L_0 jsou typické hodnoty o velikosti milimetrů, až po několik metrů. Tyto slabé kvazi čočky jsou zobrazeny na Obr. 5, jejichž výsledkem je náhodný interferenční efekt mezi různými oblastmi šířícího se paprsku, způsobující zkreslení vlny.

Vztah mezi teplotou atmosféry a jejím indexem lomu je dán vzorcem:

$$n_{as} = 1 + 77,6(1 + 7,52 \cdot 10^{-3} \lambda^{-2}) \frac{T_{as}}{T_e} \cdot 10^{-9}, \quad (5)$$

kde P_{as} je atmosférický tlak v milibarech (mbar), T_e je efektivní teplota v Kelvinech a λ je vlnová délka v nm.[1]



Obrázek 5: Atmosférický kanál s turbulentními víry.

2.3 Atmosferické faktory

2.3.1 Mlha

Mlha je nejvíce škodlivým jevem pro FSO, protože obsahuje malé dešťové kapičky s poloměrem stejné velikosti jako vlnové délky blízké infračervené oblasti pásma. Velikost částic se liší pro různé stupně mlhy. Mlha se obvykle označuje jako faktor počasí, kde bude viditelnost mezi 0 – 2000 m. Mlhové částice, které jsou blízko země nám znatelně snižují viditelnost. Různé typy mlh mají za následek rozdílnou úroveň optických ztrát. Toto je především důsledkem rozložení mlhových částic, jejich velikosti a umístění.[3]

Rozpoznáváme dva rozdílné druhy mlhy, konvektivní a advekátní. Konvektivní nebo-li radi-ační mlha vzniká chlazením zemského povrchu zářením. Tato mlha se objevuje, když je vzduch dostatečně chladný a stává se nasyceným. Principiálně se tato mlha objevuje v noci a ke konci dne s rozložením částic o velikosti 1 - 3 μm a obsahem kapalné vody mezi 0,01 a 0,1 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Ovlivňuje kratší vlnové délky (první a druhé přenosové okno) a téměř 10 μm přenosového okna. Viditelnost pro tento typ mlhy bývá přibližně 500 m. Advekátní mlha je tvořená pohybem vlh-kého a teplého vzduchu nad chladnějším mořským nebo zemským povrchem. Je charakterizována obsahem kapalné vody vyšším, než 0,2 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ a průměrem částic necelých 2 μm . Pro tuto mlhu je viditelnost okolo 200 m.[1]

2.3.2 Déšť

Déšť má vliv na sníženou viditelnost v FSO systémech, i když jeho dopad je podstatně nižší, než u mlhy. Je to proto, že poloměr dešťových kapek (200-2 000 μm) je podstatně větší, než použitá vlnová délka u FSO světelných zdrojů.[10]

Typické útlumy mají pro déšť malé hodnoty. Například, pro déšť 2,5 $\text{cm}\cdot\text{hod}^{-1}$ lze pozorovat útlum signálu okolo 6 $\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$. Proto komerčně dostupné FSO systémy pracují s 25 dB linkovým rozpětím. Tohle je zejména v případech, kdy jsou systémy rozmístěny v městských oblastech, kde je vzdálenost mezi budovami menší než 1 km. Pokud je například systém nasazen na vzdálenost menší než 500 m, ale se stejnými podmínkami deště, je útlum poloviční, tedy jen 3 $\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$. Jakmile začne déšť zvyšovat svou rychlost, například až k průtži mračen ($> 10 \text{ cm}\cdot\text{hod}^{-1}$), útlum deštěm se může stát problémem pro nasazení mimo stupnici distanční typické metropolitní oblasti. Avšak, tyto druhy průtrží mračen trvají pouze krátkou dobu (v rozsahu minut).[3]

2.3.3 Sníh

Vločky jsou ledové krystalky, které mají různé tvary a velikosti. Obecně však platí, že sníh je větší, než déšť. Sněžení by pro FSO neměl být velký problém, jelikož velikost sněhových vloček je větší, než použité vlnové délky. Slabé sněžení až po sněhové bouři spadá přibližně mezi slabý déšť až středně těžkou mlhu. Toto může být vyjádřeno útlumem spoje přibližně od 3 $\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$ do 30 $\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$. [10]

2.3.4 Smog

Smog je kombinace kouře a mlhy. Ve skutečnosti to je znečišťování ovzduší. Za tento nežádoucí faktor mohou firmy, které v důsledku spalování uhlí emitují velké množství kouře a oxidu siřičitého v důsledku spalování uhlí. Nyní je díky zákonům je smog značně redukován. Pro vozidla a průmyslové emise při interakci s vlhkostí a jinými molekulami v atmosféře, kdy sluneční světlo prochází skrz sekundární chemických znečišťujících látek. Tento proces je známý jako fotochemický smog. Fotochemický smog absorbuje a rozptyluje laserový paprsek použitý v FSO systémech.[8]

2.3.5 Viditelnost

Nízká viditelnost snižuje efektivitu a dostupnost FSO systému. Dlouhodobé pozorování počasí ukázalo, že některá města, například jako Seattle, mají nižší průměrnou viditelnost, než města jako Denver. To znamená, že pro stejnou vzdálenost a stejný FSO systém bude mít spojení v Denveru vyšší dostupnost, než systém použitý v Seattlu. K nižší viditelnosti může dojít během určitého časového období v průběhu roku, nebo konkrétní datum.[10]

Na Obr. 6 je zobrazena tabulka s mezinárodními hodnotami útlumu pro různé atmosferické podmínky.

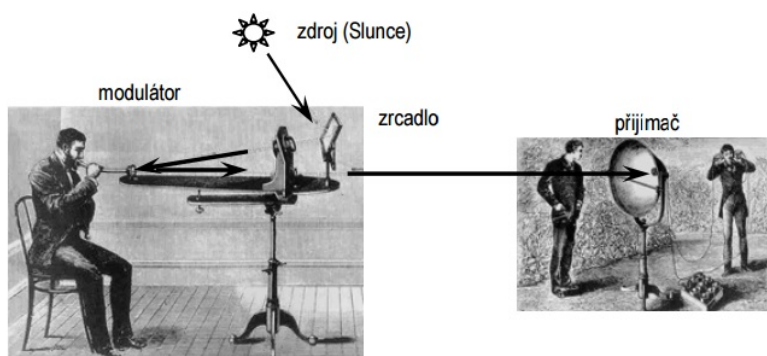
Mezinárodní tabulka viditelnosti					
Atmosférické jevy	Složky počasí [mm·h ⁻¹]			Viditelnost [m]	Útlum [dB·km ⁻¹]
Velmi hustá mlha				50	315
Hustá mlha				200	75
Středně hustá mlha				500	28,9
Řídká mlha	Sníh	Bouřka	100	770	18,3
Velmi řídká mlha				1 000	13,8
		Silný déšť	25	1 900	6,9
Lehký opar				2 000	6,6
		Středně silný déšť	12,5	2 800	4,6
Velmi lehký opar				4 000	3,1
		Lehký déšť	2,5	5 900	2
				10 000	1,1
Jasno		Mrholení	0,25	18 100	0,6
				20 000	0,54
Velmi jasno				23 000	0,47
				50 000	0,19

Obrázek 6: Mezinárodní tabulka viditelnosti a útlumu.

3 Bezdrátové optické komunikace

3.1 Historie

Historicky první zařízení, které pracovalo na základě přenosu informace optickým svazkem odpovídalo svým charakterem odpovídalo optickým bezdrátovým spojům (OBS), tak jak je chápeme v dnešní době. Patentoval jej A. G. Bell a jeho spolupracovník Ch. S. Tainter v roce 1880. Bell považoval "photophone" za svůj největší vynález. Zdrojem světla u photophonu bylo Slunce, které ozařovalo systém zrcadel, z nichž jedno mělo funkci modulátoru. Modulační zrcadlo bylo vychýlováno lidským halsem a způsobovalo změny optické intenzity na selenovém článku v přijímači. Změny detekovaného optického výkonu byly v přijímači přeměněny na elektrický proud a pomocí sluchátek opět na lidský hlas. Princip přenosu uskutečněný photophonem je znázorněný na Obr. 7.[11]



Obrázek 7: Princip Bellova "Photophonu".

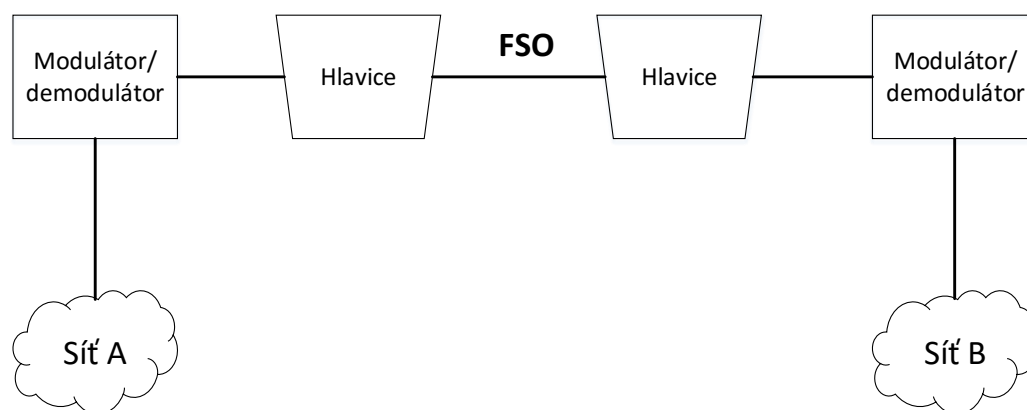
3.2 Optický atmosferický spoj

Pojem předávání informací vzduchem pomocí modulovaného světelného signálu je poměrně starý, ačkoli významný pokrok byl zaznamenán v průběhu více než posledních 10 let. Koncept zůstává relativně stejně jednoduchý. Úzký paprsek světla se vysílá z hlavice, je přenášen přes atmosféru a následně ho obdrží přijímací hlavice spoje. Pokroky, které vedly k tomu, co dnes označujeme jako přenos optického signálu ve volném prostoru neboli FSO, přišly v reakci na potřebu větší šířky pásma a zlepšení komunikačního systému. Vzhledem k tomu, že FSO používají podobné infračervené (IR) vlnové délky a mají shodné funkce přenosového pásma, je FSO často označován jako "přenos optickým bezdrátem". Jelikož optické spektrum je bezlicenční a má frekvenci řádově ve stovkách THz, většina FSO systémů používá jednoduchý On-Off Keying (OOK) jako formát modulace. Je to stejná modulační technika, která se využívá v digitálních optických vláknových systémech. Toto kličování je přenášeno v digitálním formátu se "svítí"představuje logickou "1" a "nesvítí"předsatvuje logická "0".

Při zkoumání FSO jsou důležité kvalitativní parametry, které se dělí na dvě kategorie—vnitřní a vnější. Vnitřní parametry souvisejí s návrhem FSO systému, a zahrnují optický výkon, vlnovou délku, přenosové pásmo, rozbíhavost paprsku, optické ztráty na vysílací straně a citlivost přijímače. Vnější parametry, jsou spjaty s prostředím v němž musí systém pracovat. Zahrnují viditelnost, atmosferický útlum a vzdálenost. Je důležité si uvědomit, že mnoho těchto parametrů jsou nezávislé, ale jsou spojeny dohromady k určení celkového výkonu systému. Například dostupnost, která je funkcí nejen vzdálenosti nasazení, ale i místního klimatu. Kromě toho systémy pro větší vzdálenosti (větší než 1 km) nemusí být optimálně navrženy pro vysokou dostupnost (>99,9%). Celkově lze říci, že optimální FSO konstrukce systému je velmi závislá na tom, pro jaké účely bude použita.[13]

Optický signál je šířen atmosferickým kanálem a následně sbírán přijímačem pro získání přenesených dat. Přijímač se skládá z teleskopu, detektoru a dekodéru. Teleskop sbírá optický signál a zmenšuje paprsek tak, aby byla jeho velikost vhodná pro přijetí detektorem. Detektor převádí optický signál zpět na elektrický signál. Převážně u přímých detekčních systému se přijímač skládá z fotodetektoru s lavinovou diodou (APD), filtru shody, který je implementován ve formě pohyblivého integrátoru, a časového komparátoru. Časovaný komparátor provádí prahový test na hranicích bitových intervalů.[11]

Příklad OBS komunikační sítě je znázorněn na Obr. 8.



Obrázek 8: Příklad OBS komunikační sítě.

3.3 Výhody bezvláknové optiky

- Žádné vzájemné rušení jinými spoji
- Vysoké přenosové rychlosti
- Bezlicenční využití
- Oproti vláknové optice je jednodušší
- Velká šířka pásma
- Flexibilita
- Bezpečnost proti odposlouchávání
- Příznivá cena a výkon

3.4 Nevýhody bezvláknové optiky

- Fyzické překážky
- Atmosférické vlivy způsobující rozptyl, odraz a absorpci
- Bezpečnostní rizika použití laseru

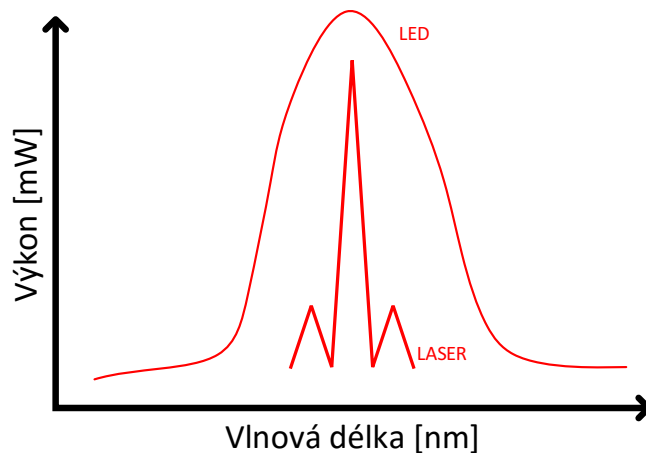
3.5 Zdroje záření

V moderních FSO systémech se používají pro přenos optických dat různé zdroje světla. Zaměříme se na přenosové zdroje na polovodičové bázi, protože v současné době jsou polovodičové lasery primární přenosové médium v FSO systémech. Hlavní rozdíly mezi těmito zdroji jsou vlnová délka, výkon a rychlost modulace. Cena pro vysoce výkonné vysílací spoje se může lišit od desítek desítek až po statisíce korun. Použití konkrétního přenosového zdroje je dáno tím, jaký je vybraný systém.

3.5.1 LED

Světlo-vyzařující dioda (LED, elektroluminiscenční dioda) je elektronická polovodičová součástka obsahující přechod P-N. Prochází-li přechodem P-N elektrický proud v propustném směru, přechod vyzařuje (emituje) světlo o určité vlnové délce (ve viditelné části spektra určuje barvu světelného záření).

Vlnová délka světelného záření diody je závislá na chemickém složení použitého polovodiče. LED jsou vyráběny pro vlnové délky blízké UV záření, přes různé barvy viditelného spektra, až po infračervené záření (InfraLED). Se zmenšující se vlnovou délkou emitovaného světla roste napětí (prahové napětí), při kterém začíná diodou procházet proud v propustném směru. Prahové napětí LED se pohybuje v hodnotách od 1,6 V do 3 V. Oproti jiným elektrickým zdrojům světla (žárovka, výbojka, doutnavka) mají LED tu výhodu, že pracují s poměrně malými hodnotami proudu a napětí. Mezi další výhody řadíme především velkou životnost, modulovatelnost velkými frekvencemi nebo malou provozní teplotu. Nevýhodou LED diod je velmi široký spektrální vstup, na rozdíl od úzkého vstupu laseru a použití pouze na vlnových délkách 850 nm a 1310 nm.[12]



Obrázek 9: Rozdíl spektrální šířky LED a laseru.

3.5.2 Laser

Jedná se o zařízení, jež se v uspořádání neliší od LED, ale jeho funkce je založena na základě stimulované emise, což napovídá i samotný název LASER. V angličtině Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což v českém překladu znamená světlo zesilované stimulovanou emisí záření. Pro laserové diody je charakteristické koherentní, rozbíhavé a monochromatické záření. Aby laserová dioda pracovala tak, jak se předpokládá, musí v propustném směru protékat větší proud, než prahový. Do té doby se bude chovat jako LED dioda (široké, monochromatické záření o malé intenzitě). Po překročení prahového proudu se začne intenzita vyzařovaného světla prudce zvyšovat do doby nasycení, a dioda je v takzvaném aktivním režimu. Laserové diody jsou schopné pracovat ve dvou režimech:

- Impulzní
- Kontinuální

V kontinuálním režimu dioda vysílá nepřetržité záření, v režimu impulzním dioda mezi dvěma impulzy nahromadí energii, a poté vyzařuje. Možnosti využití laserů jsou ohromné, především v oblastech optických komunikací, lékařských přístrojů, dálkoměrů, čtečkách otisků prstů a mnoho dalších.[14]

Porovnání spektrální šířky pásma vidíme na obrázku 9.

3.6 Fotodetektory přijímače

Fotodioda je nejpoužívanější fotodetektor pro měřicí a komunikační účely, což je způsobeno především výbornou linearitou, nízkým šumem a větší citlivostí k delším vlnovým délkám (infra). Využívá fotoelektrický jev k přeměně světelné energie na elektrickou energii. Základem je polovo-

dičový přechod, na který dopadá světlo. V obou polovodičích se dopadem fotonů uvolní dvojice elektronů – díra a proudí přechodem, přičemž náboje se na obou stranách hromadí – vzniká rozdíl potenciálů, tzv. fotoelektrické napětí. Fotodioda je provozována v závěrném směru. Bez osvětlení protéká nepatrný proud, který lineárně narůstá s narůstajícím osvětlením.[12]

3.6.1 PIN fotodioda

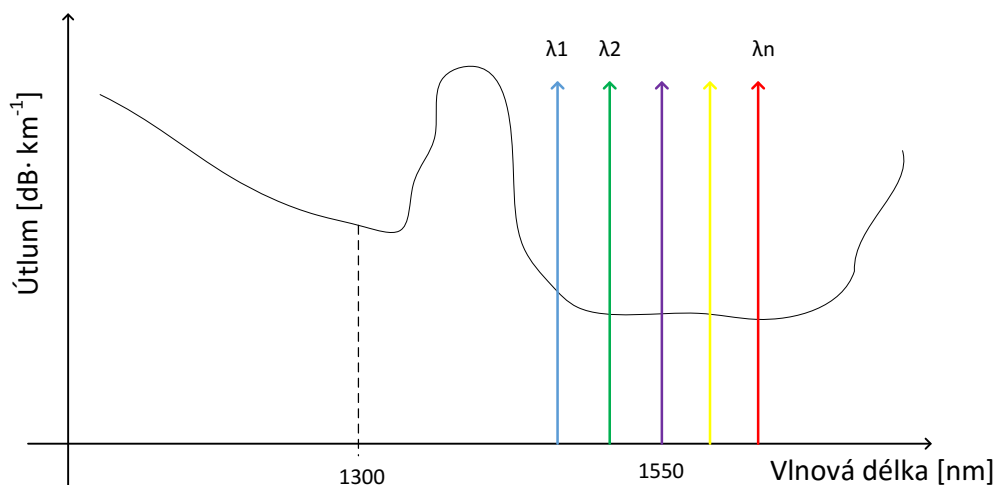
PIN fotodiody řeší problém s nízkou responsivitou a pomalou dobou náběhu v polovodičových struktur. Jsou to nejčastěji používané polovodičové detektory v FSO systémech. PIN fotodioda má širokou vnitřní polovodičovou vrstvu oddělující P a N vrstvy. Vnitřní vrstva nemá žádné volné náboje, takže její odpor je vysoký. Proto se největší pokles napětí projeví po přechodu přes vnitřní vrstvu. Vzhledem k široké vnitřní konstrukci bude většina fotonů absorbována. Zlepšuje se tím responsivita a doba náběhu se srovnáním s PN diod.[12]

3.6.2 Lavinové fotodiody

Lavinové fotodiody využívají takzvaného lavinového efektu. Pro dosažení tohoto efektu je nutno docílit velkého zrychlení elektronů generovaných fotony. Toho lze dosáhnout pomocí velkého napětí připojeného v závěrném směru, přičemž uvnitř fotodiody vzniká silné elektrické pole. Tímto důsledkem volné elektrony narážejí s velkou razancí do okolních atomů v krystalové mřížce, uvolní další páry elektron-díra a zahájí takzvanou lavinovou reakci. Lavinová ionizace způsobí, že citlivost fotodiod APD je vyšší, než u ostatních fotodiod. Vyšší je však také šum způsobený lavinovým efektem.[14]

4 Vlnově dělený multiplex

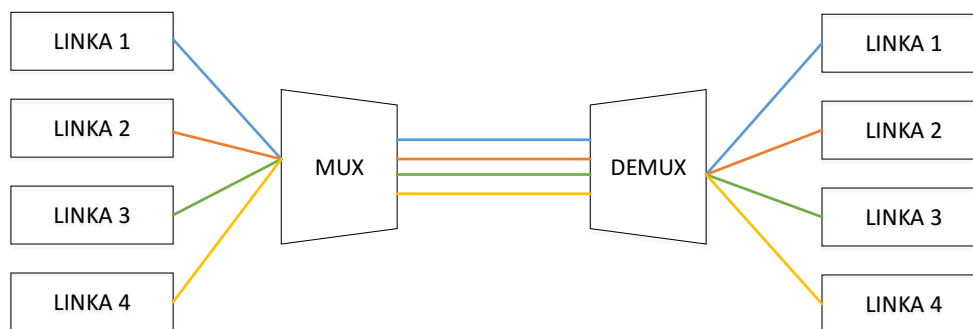
Vlnově dělený multiplex (WDM) je optická multiplexovací technologie, která využívá velkou kapacitu šířky pásma. Konceptuálně je podobná frekvenčně dělenému multiplexu (FDM), který byl již použit v radiokomunikačních systémech přes více než století. Základním principem je rozdělení velké šířky pásma optického vlákna do řady nepřekrývajících se dílčích pásem, nebo optických kanálů, a přenášet tak více optických signálů současně a nezávisle na sobě. Každý signál je nesen na jedné vlnové délce.[15]



Obrázek 10: Přenosové spektrum optického vlákna.

Obrázek 10 ukazuje přenosové spektrum na optickém vlákně. V tomto spektru jsou hlavní dvě nízko útlumové oblasti. Jedna je centrována na 1300 nm a další na 1500 nm. Obě tyto oblasti mají rozsah okolo 200 nm s útlumem menším než $0.5 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$. Teoreticky mohou tyto dvě oblasti celkově dosáhnout až $50 \text{ Tbit} \cdot \text{s}^{-1}$ nízko útlumového přenosového pásma. Nicméně maximální rychlost dána tím jak rychle je omezené elektronické zpracování koncového přístroje. Technicky je nemožné využít celou šířku pásma optického vlákna pomocí jednoho optického kanálu nebo vlnové délky. Velká šířka pásma je vyřezávána do několika optických kanálů, přičemž každý kanál pracuje při jakékoliv rozumné rychlosti, řekněme několik gigabitů za sekundu, aby byla kompatibilní se současnými elektronickými rychlostmi zpracování.[15]

Obrázek 11 ukazuje blokový diagram klasického WDM přenosového systému. Jako přenosové médium může být jednoduchá optická linka, pasivní hvězdicový coupler, atmosféra nebo jakýkoli typ optické sítě. Vysílač tvoří laser a modulátor. Laser je zdroj záření, který generuje optický nosný signál buď na pevná nebo laditelné vlnové délce. Modulátor moduluje nosný signál na elektrický a je poslán do multiplexeru. Multiplexer kombinuje více optických signálů různé vlnové délky ze vstupních portů na jeden optický signál, který se přenáší na společný výstupní



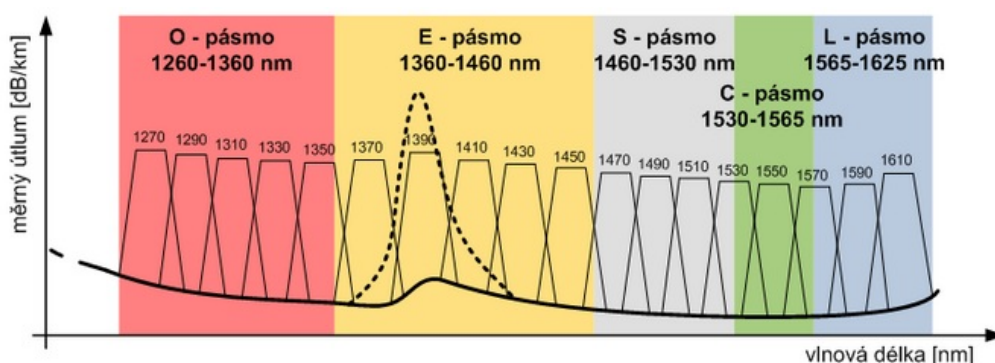
Obrázek 11: Blokový diagram WDM přenosového kanálu.

port. Demultiplexer používá optický filtr k rozdělení přijatého optického signálu na různé vlnové délky, které jsou posílány na přijímače. Přijímače obsahují detektor, například fotodiodu, a ten převádí optický signál na elektrický. V systému taky můžeme využít optické zesilovače k udržení výkonové úrovně optického signálu.

Velikost rozteče frekvence by měla být menší, než šířka pásma každého kanálu. Hustota kanálu závisí jak na šířce pásma kanálu, tak na rozteče frekvence. Například, jestliže je šířka pásma pro každý kanál 2,5 GHz, rozteč frekvence 2,5 GHz a je k dispozici 100 kanálů, tak výsledkem bude přenosová kapacita celkem o velikosti $250 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$. [15]

4.1 CWDM

Hrubé vlnové dělení (Coarse WDM) jsou definovány kanály v rozmezí 1270–1610 nm. Hrubé dělení je definováno odstupem mezi jednotlivými kanály 20 nm. Při takové rozteči musíme počítat s tolerancí $\pm 6,5 \text{ nm}$. Pro standardní jednovláknové vlákno je definováno 18 kanálů v 5. pásmu. Jednotlivé vlnové délky a jejich rozdělení do pásem nám určuje standard ITU-T G.694.2. Grafické znázornění je vidět na obrázku 12.



Obrázek 12: Kanály CWDM definované dle ITU-T G.694.2.

O (Original) – jedná se o původní přenosové pásmo v oblasti 1310 nm.

E (Extended) – použitelné jen u nových druhů vláken splňujících standard ITU-T G.652.C.25
S (Short) – pásmo s kratšími vlnovými délkami. Využívá se hlavně pro nové typy přenosů.
Hodně využívané pro CWDM

C (Conventional) – jedno z nepoužívanějších pásem hlavně u WDM. Hodí se pro velké vzdálenosti, protože hodnota měrného útlumu zde dosahuje hodnoty jen $0,2 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$.

L (Long) – hodnota měrného útlumu je zde opravdu minimální. Slouží především pro WDM přenosy. Nejčastěji se používá jako rozšíření C-pásma a tím navýšení přenosové kapacity.[16]

4.2 DWDM

Husté DWDM (Dense WDM) využívá menší rozteče mezi jednotlivými kanály, a potřebuje podstatně nižší toleranci vlnové délky jednotlivých nosných. Pro využití v optických přístupových sítích se pro použití vlnového dělení DWDM uvažuje o pásmech C a L s roztečí jednotlivých nosných cca $0,8 \text{ nm}$, což by umožnilo přenos 32 až 80 vlnových délek. Existují ale již teoretické studie pro zavedení ultra jemného vlnového dělení UDWDM (Ultra-Dense WDM), ty mohou mít rozteč $0,1 \text{ nm}$. [17]

5 Kvalitativní parametry

Měřené parametry slouží k tomu, aby jsme mohli monitorovat kvalitu a parametry spoje. V komunikačních sítích je nejzásadnějším parametrem BER (*Bit Error Rate*).

5.1 BER

BER neboli bitová chybovost je definována jako poměr počtu chybně přenesených bitů k celkovému počtu přenesených bitů za čas. Neboli, při přenosu digitálního signálu komunikačním systémem může dojít k chybě, tj. místo "1" přeneseme "0" nebo obráceně. V těchto komunikačních systémech BER zastává parametr určující kvalitu daného datového prostředí. Zjednodušeně ho lze vyjádřit vzorcem:

$$BER = \frac{N_e}{N_b}, \quad (6)$$

kde N_e je počet chybně přijatých bitů a N_b je celkový počet vyslaných bitů.

V FSO sítích bývá chybovost nejčastěji způsobena nežadoucimi vlivy v přenosovém prostředí, v našem případě v atmosférickém přenosovém prostředí. Mezi tyto rušivé vlivy řadíme rozptyl, útlum, délku přenosové cesty a také šum, jak na přijímací, tak na vysílací straně.

U bezvláknových optických komunikačních systémů je požadovaná hodnota BER alespoň 10^{-9} , tj. průměrně jedna chyba při přenosu miliardy bitů.[6]

5.2 Q-factor

Q-faktor měří kvalitu analogového přenosového signálu, který je posuzován poměrem signál-šum (SNR). Bere v úvahu fyzické rušivé vlivy působící na signál, například šum, chromatické disperze a jakákoli polarizace, nebo nelineárních efektů. Tyto vlivy mohou snížit kvalitu signálu a v konečném důsledku způsobit bitové chyby. Čím vyšší je hodnota Q-faktoru, tím lepší je SNR a tím nižší je pravděpodobnost bitových chyb.

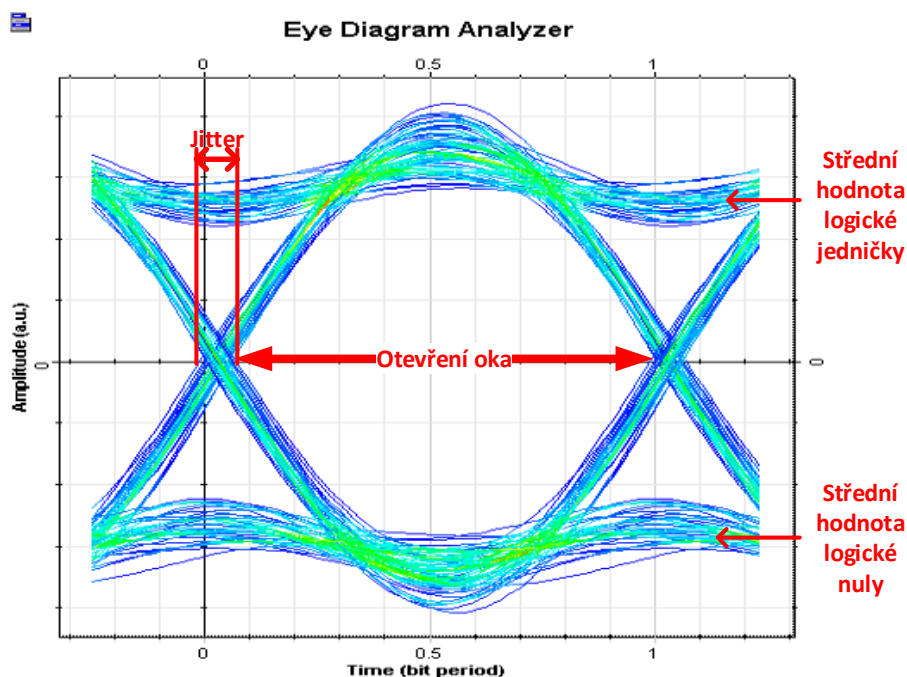
Konkrétně, Q-faktor představuje kvalitu SNR v diagramu oka (*Eye diagram*) digitálního signálu. Nejpresnější místo pro určení, zda daný bit je "1" nebo "0" je vzorkovací fáze s největším "otevřeným okem". Čím více je oko otevřené, tím větší je rozdíl mezi průměrnými hodnotami úrovně signálu pro "1" a "0". Stručně řečeno, čím větší je tento rozdíl, tím vyšší je Q-faktor a tím lepší je hodnota BER. Hodnotu Q-faktoru můžeme vypočítat dle rovnice:

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\alpha_1 - \alpha_0}, \quad (7)$$

kde I_1 je logická "1", I_0 logická "0", α_1 je standardní odchylka logické "1" a α_0 je standardní odchylka logické "0".[18]

5.3 Eye diagram

Diagram oka (Eye Diagram nebo taky Eye Pattern) byl při použití digitálních komunikačních analyzátorů u používaných FSO systémů použit pro čtení parametru technika eye pattern. Tato technika je kvalitativní měření výkonu systému. Základní parametry, které se u diagramu oka určují, jsou otevření a šířka oka. Otevření oka charakterizuje vzdálenost mezi úrovní log "1" a log "0". Čím je větší, tím je pravděpodobnost vzájemné záměny log "1" za log "0" menší. Vzdálenost mezi krajními polohami impulsů je tzv. šířka oka. Větší šířka oka dovoluje systému tolerantnější výběr místa, kde se provádí vzorkování aktuální binární hodnoty (střed oka). Chyba nastane, jestliže je oko prakticky zavřené, nebo je-li okamžik vzorkování posunut v důsledku fázového neklidu. Z diagramu oka je možné kvalitně vyhodnotit některé rušivé vlivy, jako je mezisymbolová interference, jitter, proměnná rychlost šíření signálu kanálem, flukтуаční šum a pod.[19]



Obrázek 13: Diagram oka.

6 Návrh WDM FSO spoje

Návrh WDM FSO spoje byl proveden v simulačním programovém prostředí OptiSystem 13 od kanadské společnosti Optiwave. Firma se zabývá vývojem simulačních softwarů pro optoelektroniku. Toto simulační prostředí je výhodné pro jeho velkou sílu vytvořit v něm spoustu systémů a funkcí okolo optoelektroniky. Výhodou tohoto softwaru je neustálá aktualizace a rozšiřování databáze součástek a obvodů.

Hodnoty dosažené v simulaci jsou podobné těm, jaké jsou použity na FSO spoji mezi budovou A, která se nachází v areálu školy VŠB-TUO a planetárium, vzdaleného něco přes 1400 m. Viz Obr. 14.



Obrázek 14: Mapa trasy FSO spoje.

Pro zadávání hodnot existují tři módy Normal, Sweep a Script. Při Normal módu se zadává statická hodnota. Sweep je mód, kde se nastavuje krokování hodnot. Tyto kroky se budou postupně vykonávat a lze nastavit lineární, logaritmické nebo exponenciální rozložení hodnot. Pro vlastní nastavení hodnot existuje možnost vytvoření skriptu a přes Script mód ho následně nahrát.

Ještě před začátkem tvorby návrhu schématu FSO spoje bylo zapotřebí si nastavit parametry simulace v prostředí softwaru Optisystem. Byla nastavena přenosová rychlost simulace na $1,25 \cdot 10^9 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1}$, sekvenční délka 128bitů a symbolová přenosová rychlost na $2,5 \cdot 10^9 \text{ symbol} \cdot \text{s}^{-1}$.

6.1 Vysílací část

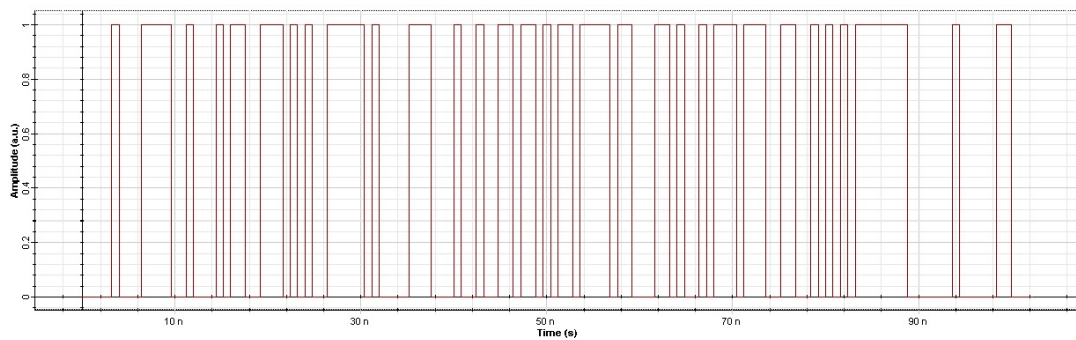
Vysílací část je tvořena PRBS Generator (Pseudo-random bit sequence generator) modulem, který náhodně vygeneruje sekvenci bitů o zadané velikosti pro přenos.

Zde bylo nastaveno pouze přenosová rychlost (Bit rate) na hodnotu $1,25 \text{ GBit}\cdot\text{s}^{-1}$. Ostatní parametry byly již přednastavené.

Dále je tato část tvořena modulem pro NRZ puls generátorem, který vytváří pulzy z příchozí sekvence bitů. CW laserem, který nám udává vysílací výkon hlavice spoje a, na kterém je nastavena frekvence, na jaké bude daný přenosový kanál vysílán. V tomto případě se jedná o první linku. Dále postačilo pro simulaci nastavit vysílací výkon 50 mW a šířku laserového paprsku na 25 MHz.

Modul Mach-Zehnder Modulator se používá pro modulování paprsku světla a je ovládán napětím z modulatoru. Násladně je Mach-Zehnder modulator veden do WDM multiplexoru, do kterého je přivedeno dalších 7 vysílacích částí.

Modul NRZ puls generátor vygeneroval z příchozí frekvence signál vhodný pro přenos. Tento vygenerovaný NRZ signál je zobrazen na Obr. 15

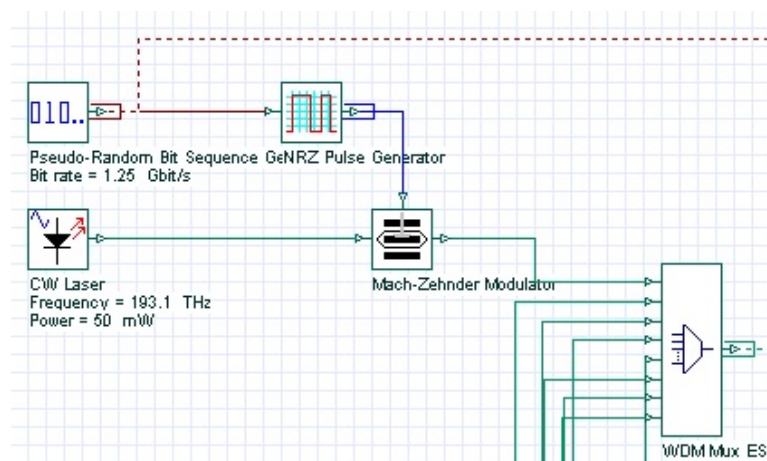


Obrázek 15: Vygenerovaný náhodný NRZ signál na prvním kanálu.

Mach-Zehnder modulator je druh modulátoru strukturovaný tak, že má dvě ramena a přijatý signál je rozdělen mezi ně. Obě ramena vyvolávají jiný fázový posun. Změnou fáze na rameni (za použití napětí na něm) můžeme modulovat vstupní signál na výstupu. Například, jestliže je rozdíl fáze mezi rameny 180° , na výstupu bude nula. Jestli mezi nimi nebude žádný rozdíl fáze, tak získáme celý vstup na výstupu. Takhle lze provádět amplitudovou, frekvenční nebo fázovou modulaci.

WDM Multiplexer (MUX) je modul, který přijímá řadu optických datových nosných signálů z různých zdrojů. Ty dělí na různé vlnové délky. Rozestup jednotlivých vlnových délek je 0,8 nm, čemuž odpovídá využití technologie DWDM. V této simulaci byl použit 8-kanálový multiplexer. Tudiž je využito 8 vlnových délek v pásmu 1550 nm začínajících na vlnové délce 1552,5 nm a rozestup dalších vlnových délek je 0,8 nm. Tyto datové signály se později vysílají na těchto vlnových délkách.

Kompletní vysílací část jedné linky je zobrazena na Obr. 16.

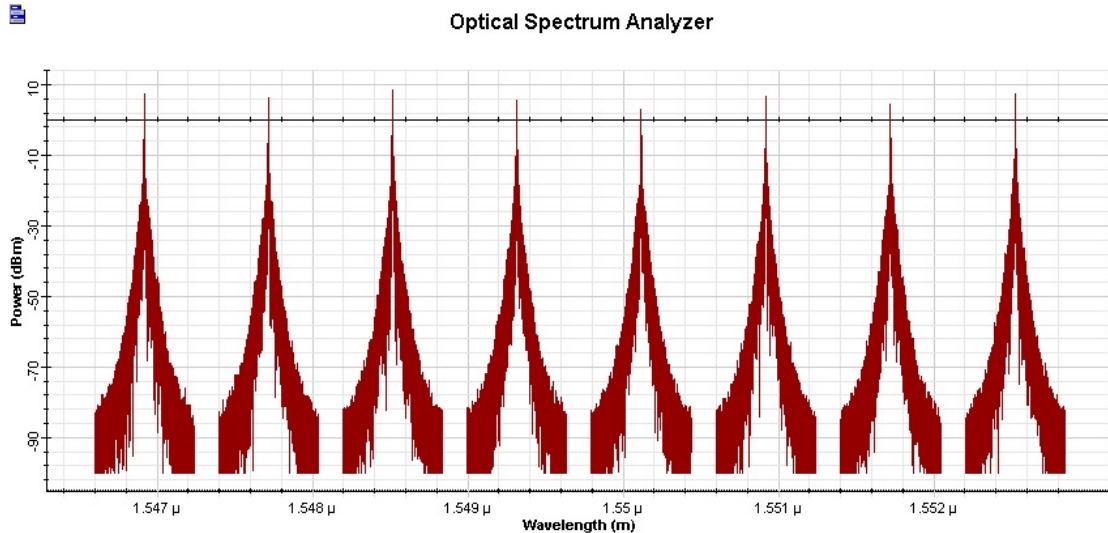


Obrázek 16: Vysílací část jednoho kanálu.

6.2 Přijímací část

Přijímací část návrhu tvoří pouze tři moduly a to WDM demultiplexer (DEMUX), přijímací fotodiodu a BER analyzátor, který zároveň slouží jako nástroj pro zobrazení diagramu oka.

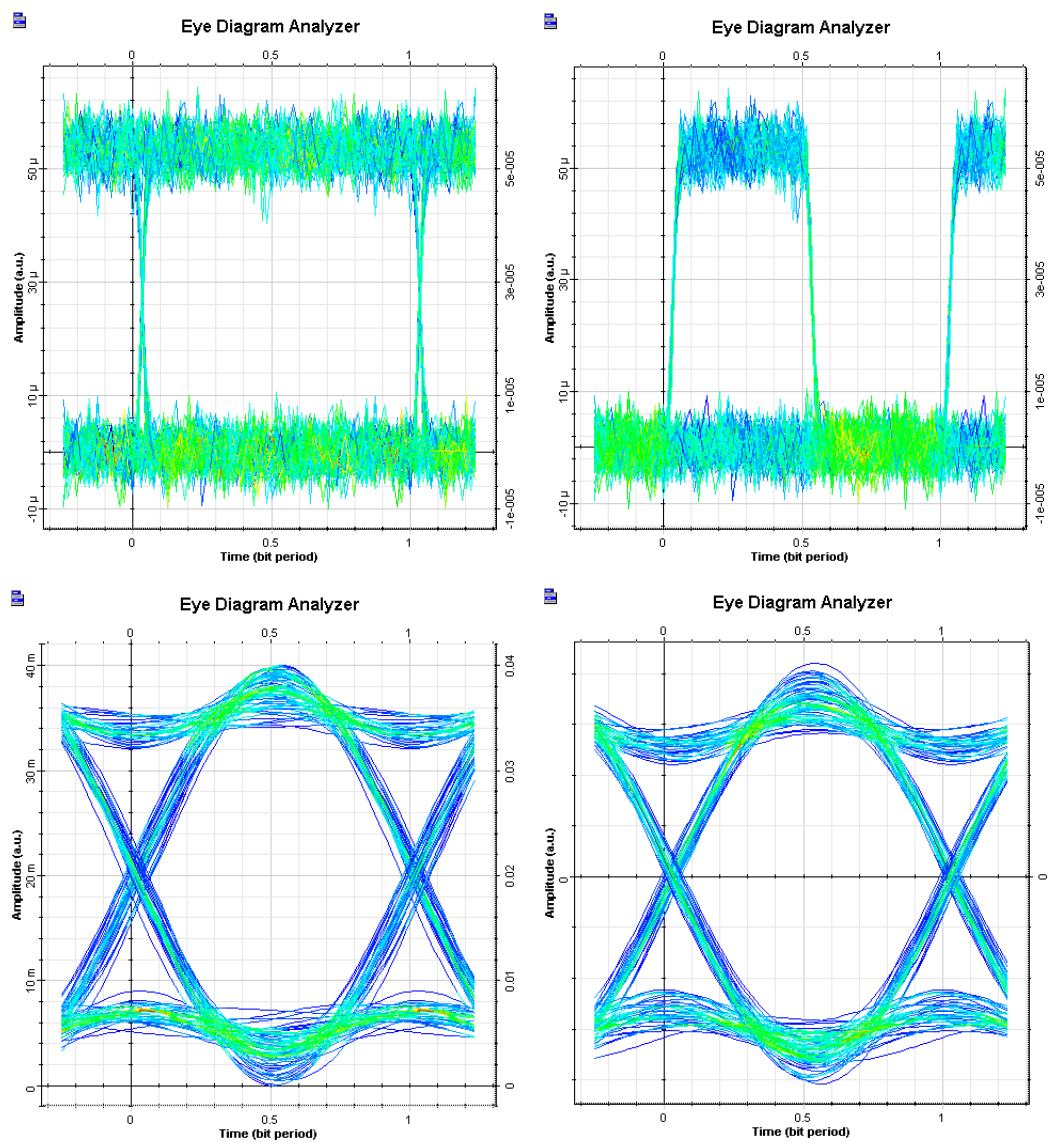
WDM demultiplexer modul je opakem multiplexeru, který přijímá optické paprsky datových signálů. Obsahuje filtr – materiál, který má pro každou vlnovou délku jiný index lomu. WDM DEMUX musí mít nastaveny stejné parametry, jaké jsou u WDM MUX. Na Obr. 17 lze vidět optické spektrum, které DEMUX přijímá. Největší špičky ukazují, jaké vlnové délky byly použity.



Obrázek 17: Optické spektrum.

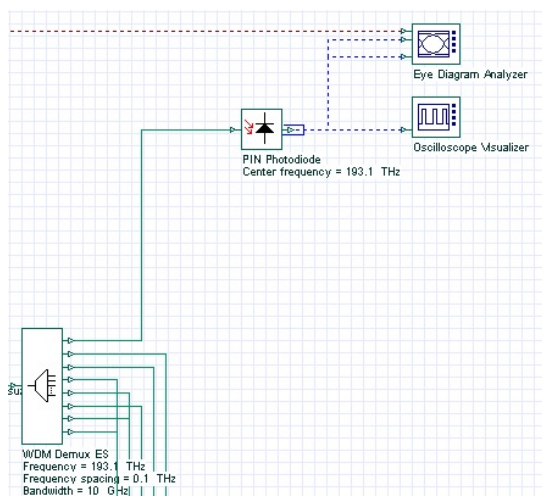
Příchozí optický signál je nutné zpracovat a převést na elektrický. K tomu slouží fotodioda. Byla možnost použít PIN nebo APD lavinovou diodu. Nejlepší volbou byla fotodioda typu PIN. U tohoto modulu se nastavuje centrální vlnová délka, responzivita (velikost proudu generovaný fotodiodou při dopadajícím optickém výkonu), modulační šířku pásma nebo účinnost diody.

Poslední modul v přijímací části je BER analyzátor. Ten zobrazuje diagram oka přijmaného přenosu a udává velké množství výsledných hodnot. Nás zajímá hlavně hodnota BER. Na následujícím obrázku lze vidět všechny příklady diagramu oka použitých modulací v návrhu. Kde byly nastaveny stejné nastavené v prostředí. Vysílací výkon 50 mW, byla použita jediná linka, trasa 1 400 m, útlum trasy $4,6 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ a malá turbulence $C_n^2 = 10^{-18} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$. Diagramy oka pro jednotlivé modulace jsou k vidění na Obr. 18.

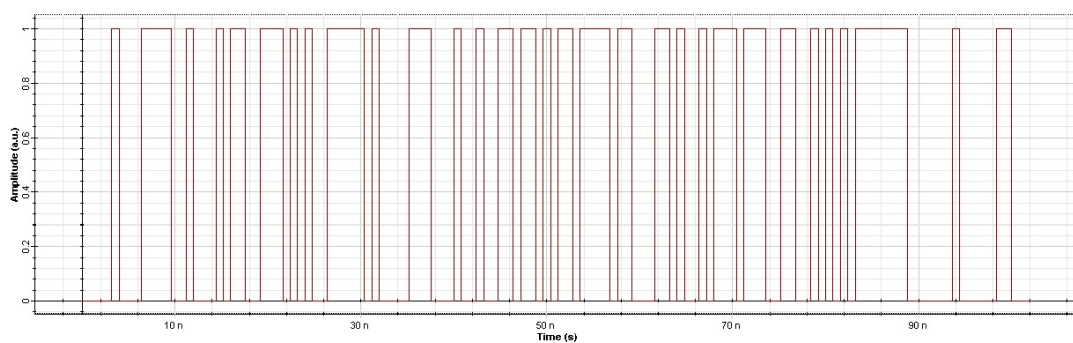


Obrázek 18: Diagramy oka jednotlivých modulací a)NRZ, b)RZ, c)QAM, d)BPSK.

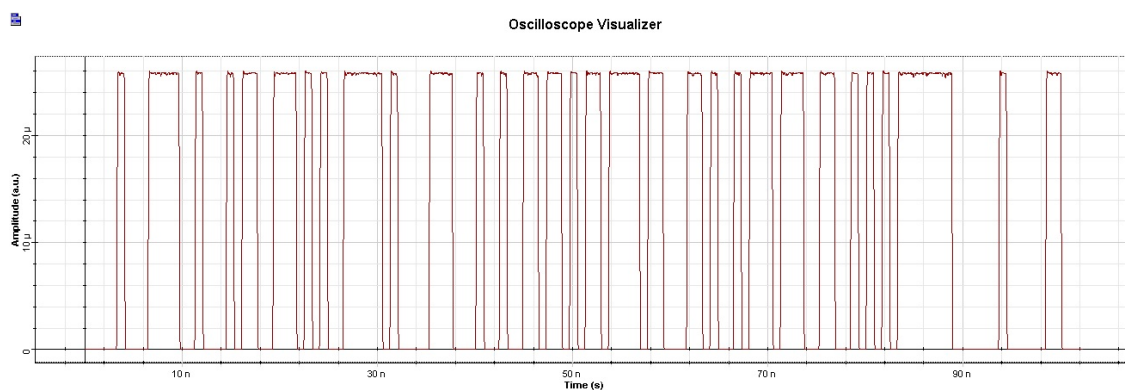
Celá přijímací část složená z WDM demultiplexeru, PIN fotodiody a BER analyzátoru je zobrazena na obrázku 19, přenesený signál na Obr. 20. Můžeme vidět, že přijímaný signál je mírně zdeformován, než signál vysíláný, který je zobrazen na Obr. 15.



Obrázek 19: Celá přijímací část



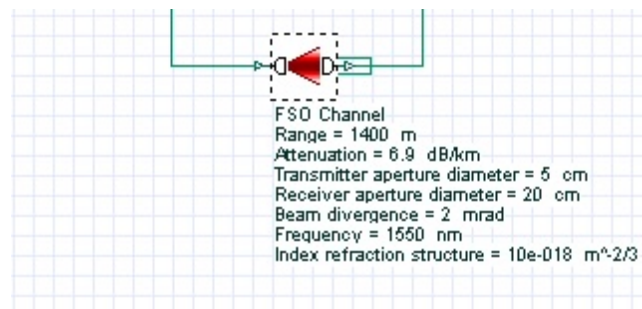
Obrázek 20: Zobrazení vysílaného signálu pro přenos FSO systémem



Obrázek 21: Zobrazení přijímaného signálu po přenosu FSO systému

6.3 Přenosová část

Tato část se skládá pouze z modulu FSO spoje. Tento modul je ze všech nejdůležitější. Nastavují se u něj všechny důležité parametry. Hlavními parametry je délka spoje mezi hlavicemi (v tomto případě je to 1400 m) a útlum v debibelech na kilometr [dB·km⁻¹], ten udává jak velký útlum bude simulován na jeden kilometr. Dále byl nastavený průměr čočky vysílací hlavice na 5 cm a průměr čočky přijímací hlavice 20 cm. Rozbíhavost paprsku byla nastavena 2 mrad a přenosové okno o vlnové délce 1550 nm. Další podstatný parametr je strukturní parametr indexu lomu C_n^2 , který udává míru velikosti turbulence v atmosféře.

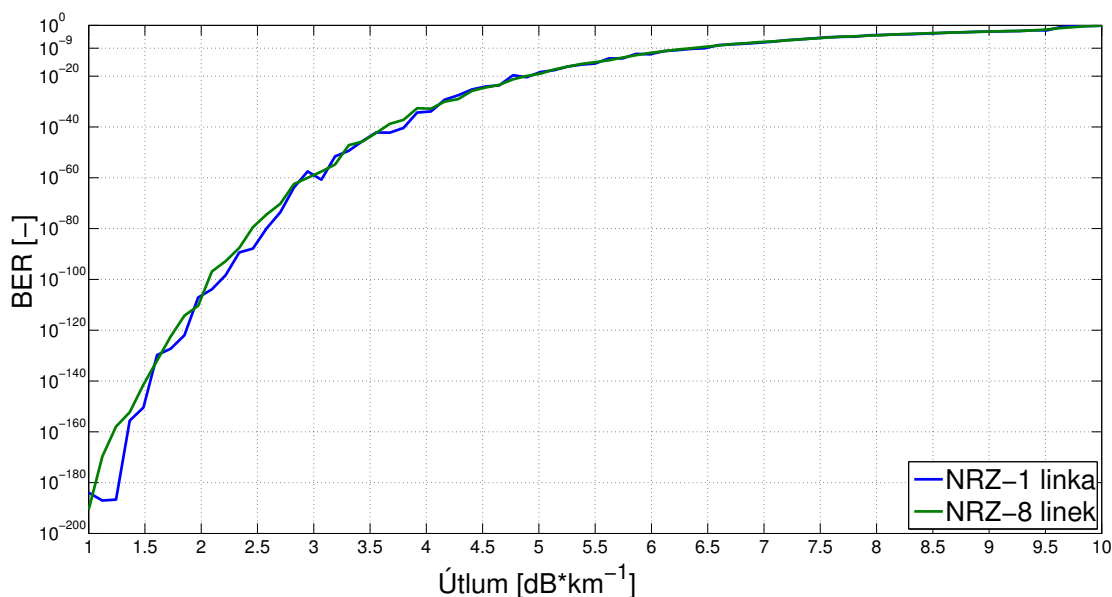


Obrázek 22: Schéma přenosové části FSO spoje.

7 Vyhodnocení nasimulovaných dat

7.1 Vyhodnocení pro modulaci Non-Return-to-Zero

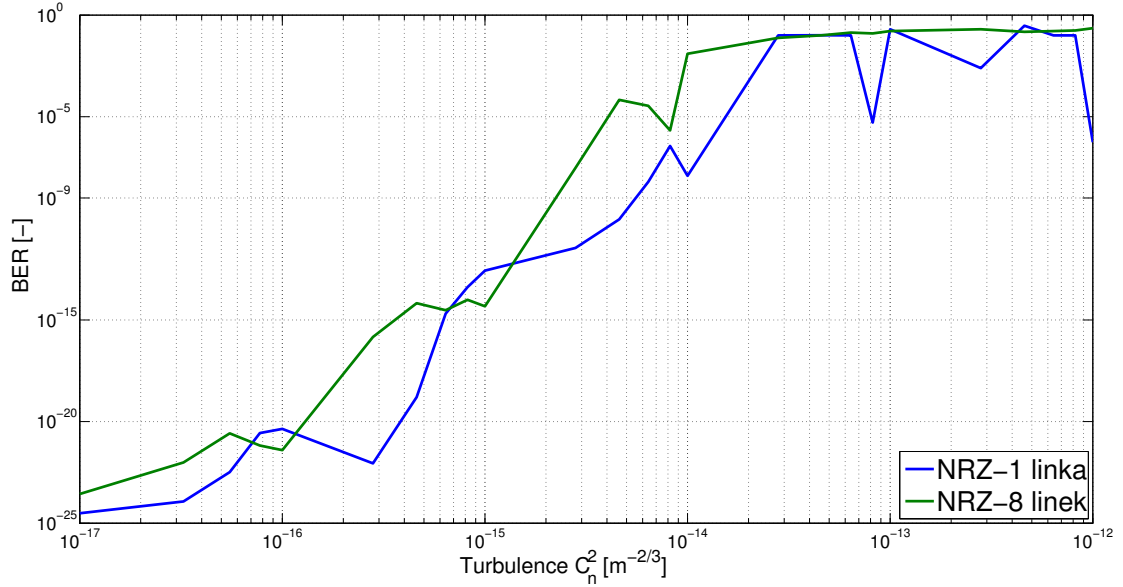
V prvním případě probíhala simulace WDM s použitím modulaci NRZ. Pro tuto modulaci je specifické, že logická "1" je reprezentována impulzem světla pro datový tok a tento impuls trvá po celou dobu jeho periody. Naopak, při logické "0" nedochází k žádnému impulsu. Tento kód je snadné generovat, nicméně neobsahuje žádné možnosti opravy chyb. Schéma této simulace je k dispozici v příloze Obr. 37. Při simulaci byl zkoumán vliv počasí na navrhnutý FSO spoj. Tedy byla zjišťována kvalita spojení resp. chybovost BER při změně útlumu na trase. Výsledná hodnota je průměrná hodnota z proběhlých 10 měření, čímž byly odstraněny ojedinělé odchylky měření. Z následného vynesení hodnot do grafu, který je zobrazen na Obr. 23. Lze varovat rozdíl mezi chybovostí při použití přenosu pomocí jedné vlnové délky, oproti chybovosti při použití vlnového multiplexu 8 kanálů. Při této modulaci bude linka použitelná, jak při využití jedné nebo více linek, téměř do útlumu $6,5 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$, poté dojde k rozpadu spojení z důvodů nerozeznání šumu od signálu. Této hodnotě útlumu odpovídá velmi řídká mlha, zvětšené sněžení nebo silný déšť ($25 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$). Rozdíl mezi chybovostí při multiplexovaném přenosu je oproti bezmultiplexovému přenosu nepatrný.



Obrázek 23: Graf závislosti BER na změně útlumu za použití NRZ modulace.

Dále probíhala simulace vlivu turbulence, tedy změny strukturního indexu lomu C_n^2 na trase. Také pro simulaci změny velikosti C_n^2 bylo měření provedeno 10-krát a výsledné hodnoty byly zprůměrovány. Použití více multiplexovaných linek oproti jedné je zřetelně vidět na Obr. 24, ve kterém jsou vyneseny výsledné hodnoty ze simulace. Kvalitní přenos informací při využití

NRZ modulace bude pro jednu linku do turbulence o velikosti $C_n^2=5,5 \cdot 10^{-15} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$ a při použití multiplexu osmi linek $C_n^2=2,4 \cdot 10^{-15} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$. Po překročení těchto hodnot bude tento spoj nevhodný pro kvalitní přenos dat. Multiplex s méně linkami je spoj odolnější k turbulencím. K těmto hodnotám může dojít kolem poledne, kdy je hodnota C_n^2 největší.

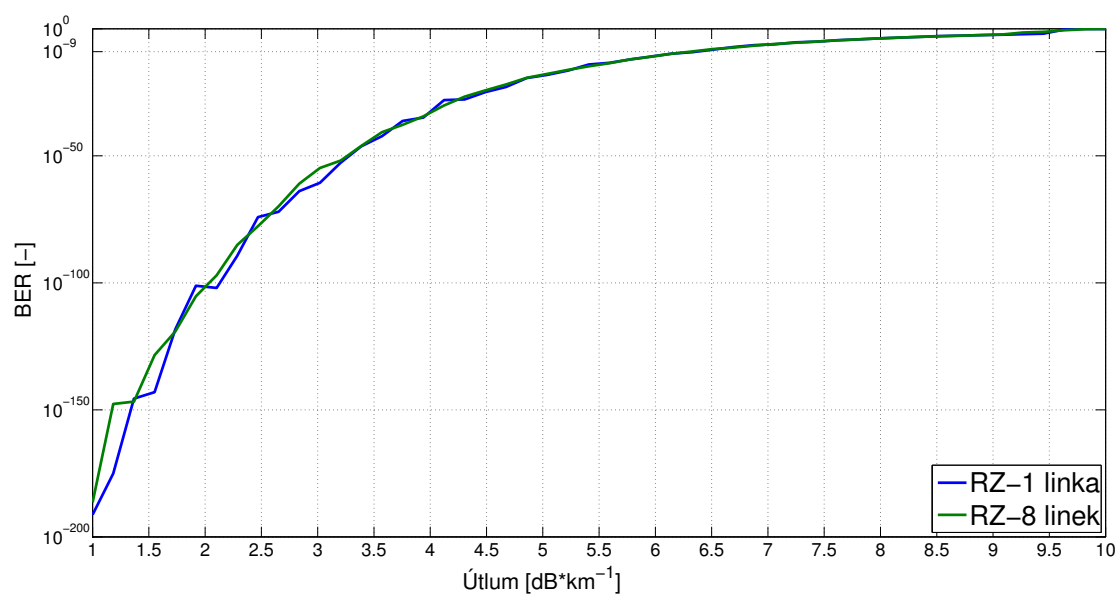


Obrázek 24: Graf závislosti BER na změně $C_n^2 [\text{m}^{-\frac{2}{3}}]$ při modulaci NRZ.

7.2 Vyhodnocení pro modulaci Retrun-to-Zero

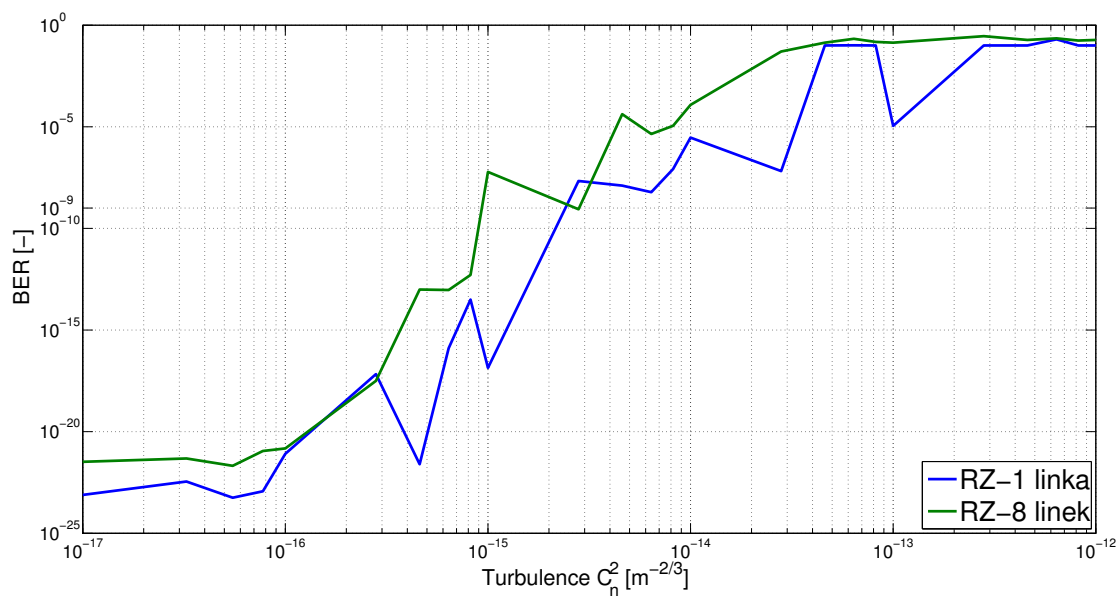
Dalším krokem byla simulace pro modulaci RZ. V této modulaci je logickou "1" vyjádřený impuls o určité amplitudě a trvá méně než je doba periody bitu. Logická "0" vyjadřuje absenci impulsu. Return-Zero tedy znamená, že impuls se vrátí k nule ještě dřív, než skončí perioda daného bitu. Nevýhodou RZ je dlouhotrvající řetězec nulových bitů, tím může dojít ke ztrátě časové synchronizace. Schéma návrhu pro tuto modulaci je vidět v příloze Obr. 38. Opět byl zkoumán vliv počasí na chybovost pro tento FSO spoj. Stejně jako při předešlé modulaci NRZ bylo provedeno 10 simulací a výsledky pro eliminaci chybových odchylek byly zprůměrovány. Na Obr. 25 jsou vyneseny zprůměrované hodnoty BER závislé na změně útlumu. Z grafu lze odečíst, že linka bude mít spolehlivý přenos do útlumu okolo $6,25 \text{ db} \cdot \text{km}^{-1}$. Meteorologickým hodnotám tomuto útlumu odpovídá řidší mlha, silnějšímu dešti nebo sněžení. Rozdíl mezi použitím 8-kanalového multiplexu nebo přenosu jedné linky je minimální.

Namísto změny útlumu se při další simulaci měnila míra turbulence, tedy její strukturní index lomu C_n^2 . Simulace byla prováděna 10-krát a jako předchozí simulace byly výsledné hodnoty zprůměrovány. Použití více linek multiplexu oproti jedné je zřetelně vidět na Obr. 26, ve kterém jsou vyneseny výsledné hodnoty ze simulace. Kvalitní přenos informací při modulaci RZ bude pro jednu linku do turbulence $C_n^2=2,5 \cdot 10^{-15} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$ a při použití více linek $C_n^2=9,5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$.



Obrázek 25: Graf závislosti BER na změně útlumu za použití RZ modulace.

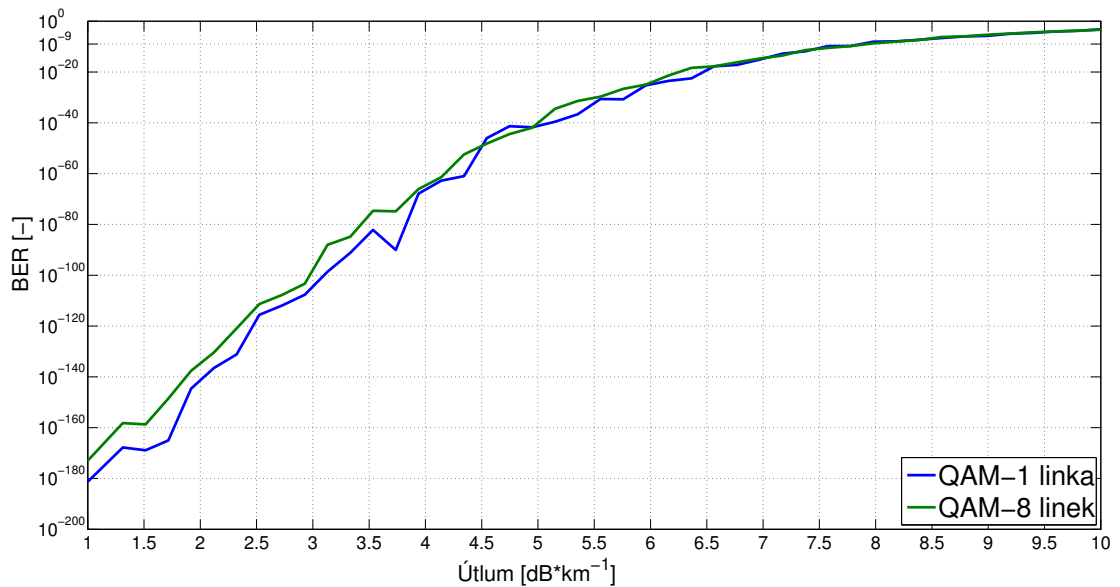
Po překročení těchto hodnot dojde k rozpadu spojení. Lze říci, že při použití méně linek vydrží spoj větší turbulence.



Obrázek 26: Graf závislosti BER na změně C_n^2 [m^{-2/3}] při modulaci RZ.

7.3 Vyhodnocení pro modulaci QAM

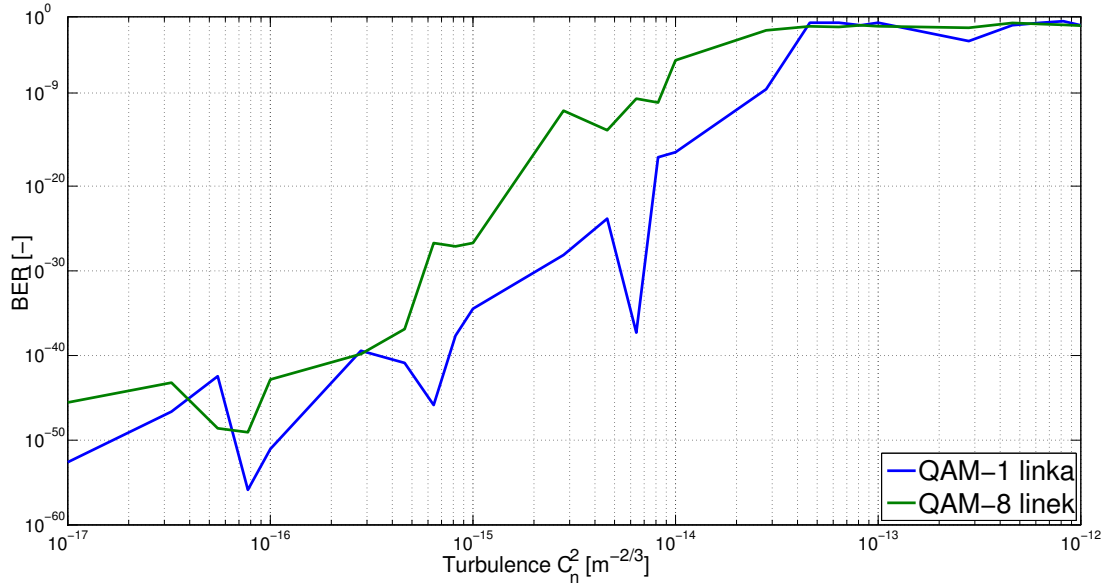
V další simulaci pro útlum na trase bylo využito modulace QAM. Tato modulace dokáže šetřit s šířkou pásma nebo naopak, pro danou šířku pásma dokáže zvýšit přenosovou rychlost. QAM využívá kombinaci změny stavu amplitudy a fáze, kde každý stav je reprezentován určitou hodnotou. Jedná se o vícestavovou modulaci, což znamená, že za jeden okamžik (stav) se přenesou více bitů najednou. Schéma návrhu simulace pro QAM modulaci je zobrazeno v příloze Obr. 39. Opět pro vyrušení chybových odchylek byla simulace provedena 10-krát a zprůměrované výsledky byly vyneseny do grafu, ten je zobrazen na Obr. 27. Při této modulaci už lze zpozorovat rozdíl mezi využitím pro přenos informací přes samostatnou linku nebo pro přenos s vlnovým dělením osmi linek. Taktéž lze vyčíst, že spoj bude mít kvalitní přenos dat do útlumu $7,8 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$. Této hodnotě útlumu na trase odpovídají atmosferické faktory jakou jsou sníh, silný déšť nebo velmi řídká mlha.



Obrázek 27: Graf závislosti BER na změně útlumu za použití QAM modulace.

Další krok byl provést simulaci pro modulaci QAM při změně turbulence resp. parametru C_n^2 namísto změny velikosti útlumu na trase. Simulace byla opakovaně prováděna 10-krát, výsledky se museli zprůměrovat a vynést do grafu. Tento graf je zobrazen na Obr. 28, z grafu můžeme vypočítat rozdíl mezi použitím jedné linky a multiplexu pro 8 linek. V grafu taky lze zpozorovat při použití jedné linky užitečné turbulence, kdy hodnota BER prudce klesne. Při použití multiplexu pro 8 linek tento jev není tak zřejmý. Kvalitní spojení při QAM modulaci bude pro jednu linku do turbulence hodnoty $C_n^2 = 2,6 \cdot 10^{-14} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$ a při použití multiplexu osmi linek $C_n^2 = 8,6 \cdot 10^{-15} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$. Po překročení těchto hodnot dojde k rozpadu spojení. Při použití méně vlnových délek bude spoj kvalitnější pro větší celé turbulence. Spoj bude použitelný po celý den,

kolem poledne může nastat zhoršení kvality přenosu, jelikož se začnou v atmosféře objevovat menší turbulentní cély, tím dojde k vysokým hodnotám C_n^2 .

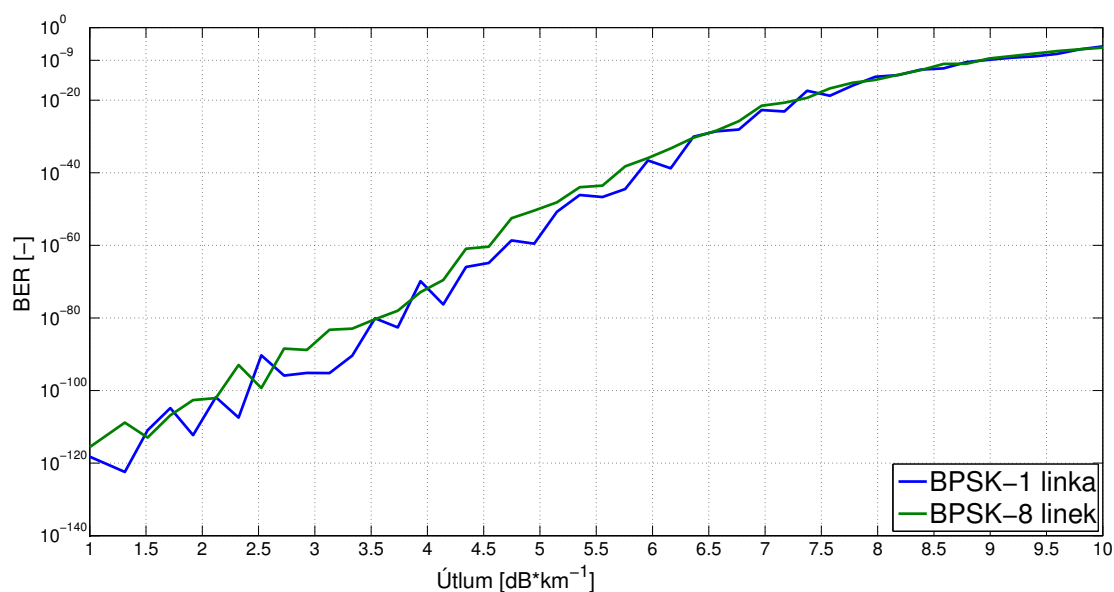


Obrázek 28: Graf závislosti BER na změně C_n^2 [$\text{m}^{-2/3}$] při QAM modulaci.

7.4 Vyhodnocení pro modulaci BPSK

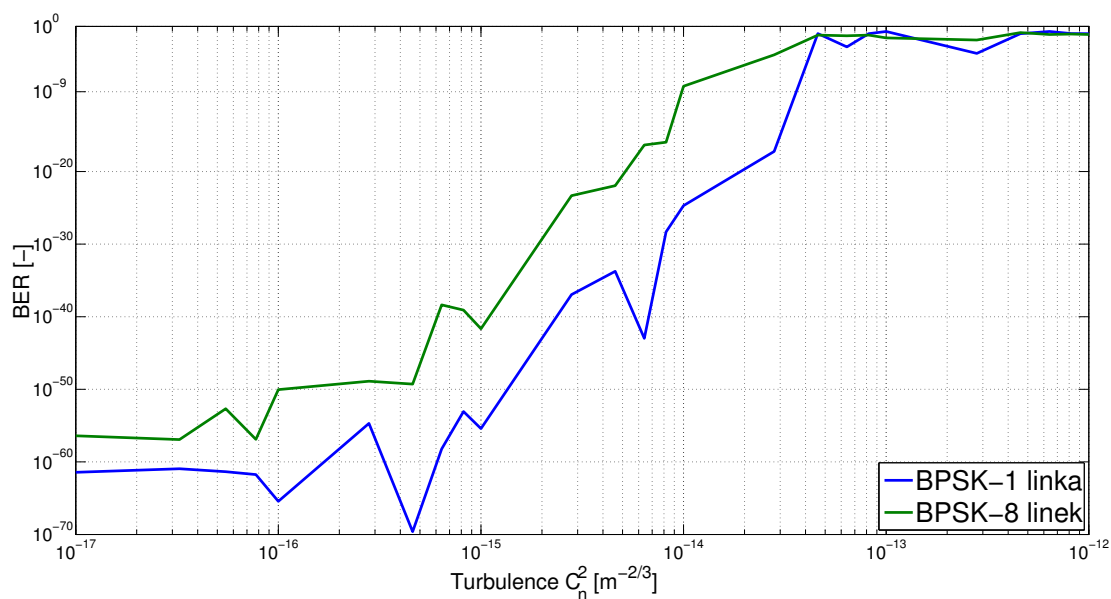
V posledním případě se jednalo o simulaci útlumu na FSO spoji za použití modulace BPSK. Jedná se o modulaci, která přenáší data změnou nebo modulováním nosného signálu. Jde o nejjednodušší formu fázového klíčování. Jako taková funguje na změně fáze a to buď o 0° nebo 180° , kde právě při změně bitu dochází k změně fáze. Navrhnuté schéma pro tuto modulaci BPSK je zobrazeno v příloze Obr. 40. Jako všechny simulace i tato proběhla 10-krát pro eliminaci nepříznivých chybových odchylek. Na Obr. 29 jsou k vidění vynesené výsledné hodnoty do grafu. Z tohoto grafu lze vyčíst, že navrhnutý FSO spoj bude data přenášet do necelých $9 \text{ db} \cdot \text{km}^{-1}$. Této hodnotě útlumu na trase bude odpovídat počasí jako je sněžení, silný déšť nebo řidší mlha. Rozdíl mezi použitím jedné linky a multiplexem pro 8 vlnových délek je z grafu znatelný, pro jednu linku bude kvalitnější přenos informací.

Dalším krokem bylo pro modulaci BPSK provedena simulace změny turbulence resp. jeho parametru C_n^2 namísto změny velikosti útlumu na trase jako v prvním případě. Simulace byla opakovaně prováděna 10-krát, a bylo potřeba hodnoty zprůměrovat a vynést výsledné hodnoty do grafu. Tento graf je zobrazen na Obr. 30, z grafu lze vypočítat rozdíl mezi použitím jedné linky a multiplexem pro 8 vlnových délek. V grafu taky jde vidět u použití jedné linky užitečná turbulence, kde hodnota BER prudce klesne jako tomu bylo u modulace QAM. Kvalitní přenos spoje při BPSK modulaci bude pro jednu linku do turbulence $C_n^2 = 3,5 \cdot 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ a pro použití



Obrázek 29: Graf závislosti BER na změně útlumu za použití BPSK modulace.

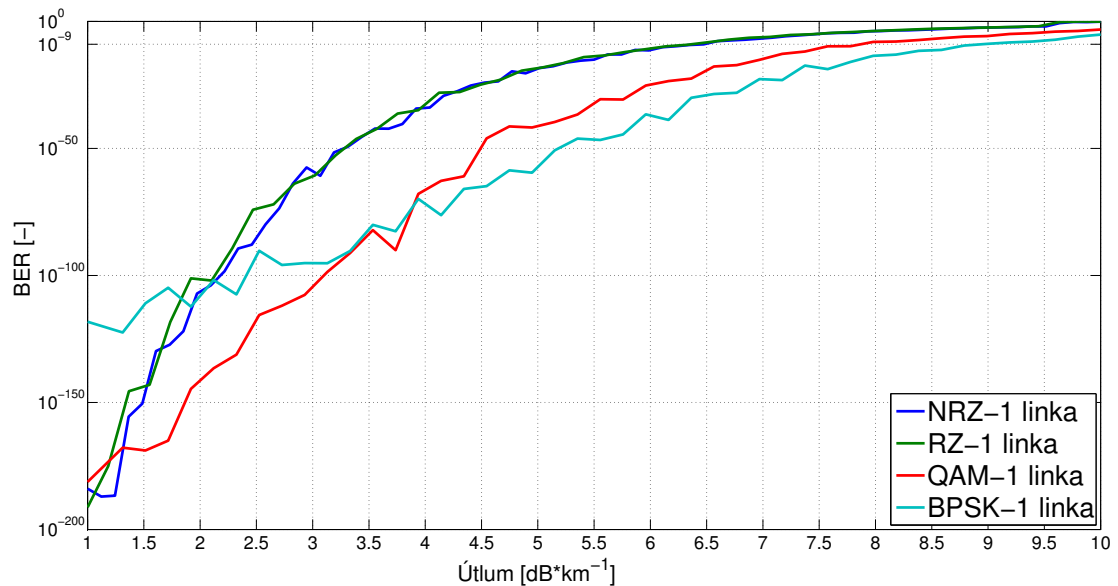
8 vlnového multiplexu $C_n^2 = 9,8 \cdot 10^{-15} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$. Po překročení těchto hodnot dojde k zhoršení nebo dokonce ke ztrátě spojení. Opět při použití méně linek vydrží spoj větší celý turbulence.



Obrázek 30: Graf závislosti BER na změně $C_n^2 \text{ [m}^{-\frac{2}{3}}\text{]}$ při BPSK modulaci.

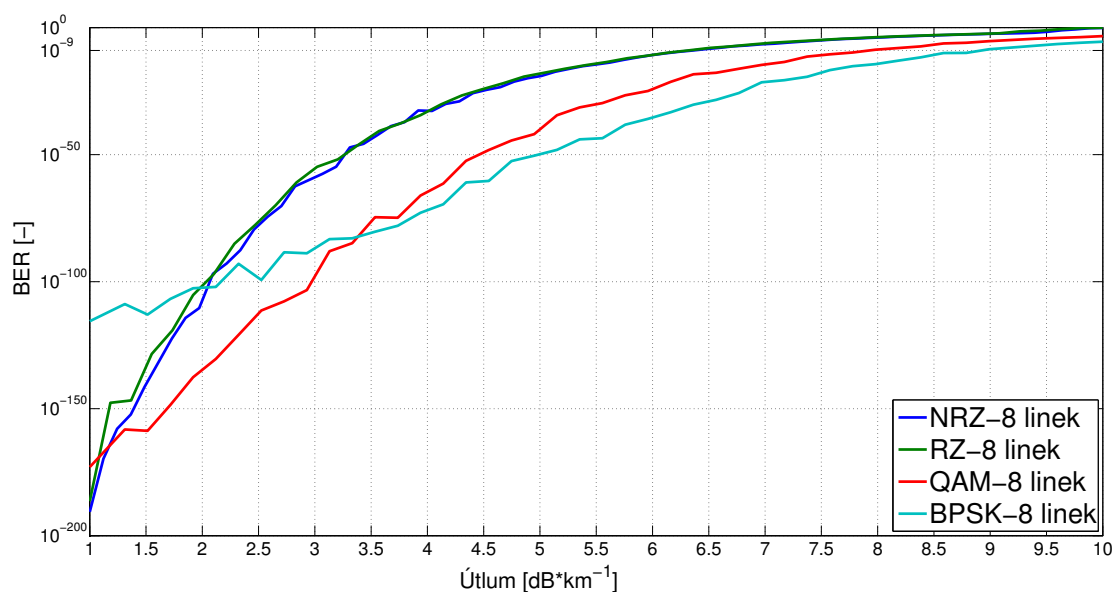
7.5 Porovnání modulací

Na následujícím Obr. 31 a 32 je zobrazeno porovnání všech modulací. Na prvním obrázku je srovnání použití jen jedné linky, na druhém při využití 8 vlnového multiplexu. Z těchto grafů lze zpozorovat, že modulace NRZ a RZ jsou v použitelnosti a kvalitě spojení velmi podobné. Za to v porovnání modulací QAM a BPSK jsou viditelné rozdíly. Pro modulaci QAM je kvalitnější přenos do útlumu trasy $4 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ než pro modulaci BPSK. Od této hodnoty útlumu začne být vhodnější pro přenos modulace PSK. Pro srovnání kdy dojde k rozpadu spojení, tak pro modulaci NRZ a RZ to bude při hodnotě $6,8 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$, pro modulaci QAM při hodnotě $7,8 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ a pro BPSK modulaci při hodnotě $9 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$. Z těchto grafů určíme jako nejpříjemnější variantu pro přenos modulaci BPSK, která zvládne kvalitní přenos informací po hodnotu útlumu na trase $9 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$.



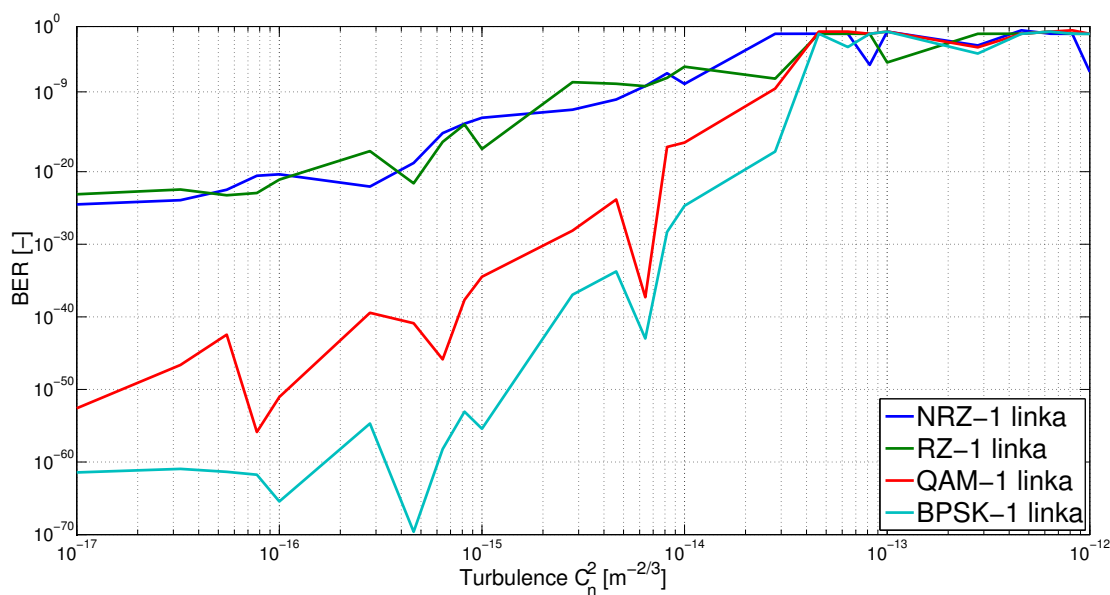
Obrázek 31: Porovnání modulací za použití jedné linky, závislosti BER na změně útlumu.

Na následujícím Obr. 33 a 34 je zobrazují porovnání všech modulací při změně velikosti turbulence, resp. změny jejího strukturalního indexu lomu C_n^2 . Na prvním obrázku je srovnání při aktivitě jen jedné linky, na druhém při využití 8 kanalového multiplexu. Z těchto grafů lze zpozorovat rozdíly modulací NRZ a RZ, ty jsou ve kvalitě spojení velmi podobné. V porovnání s modulacemi QAM a BPSK jsou znatelné rozdíly. Avšak k rozpadu spojení dojde u NRZ modulace při hodnotě $C_n^2 = 5,5 \cdot 10^{-15} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$ a u RZ při $C_n^2 = 2,5 \cdot 10^{-15} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$. QAM a BPSK modulace je na tom o něco lépe. Pro QAM modulaci to jsou hodnoty $C_n^2 = 2,5 \cdot 10^{-14} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$ a pro BPSK $C_n^2 = 3,5 \cdot 10^{-14} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$. Toto byly hodnoty pro jednu linku, narozdíl od útlumu je použití 8 kanalového multiplexu u turbulence znatelné při rozpadu spoje. Kde pro modulaci NRZ $C_n^2 = 2,2 \cdot 10^{-15} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$ a RZ $C_n^2 = 9,5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$. U modulace QAM je to $C_n^2 = 8,5 \cdot 10^{-15} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$ a BPSK $C_n^2 = 9,5 \cdot 10^{-15} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$. Po překročení těchto



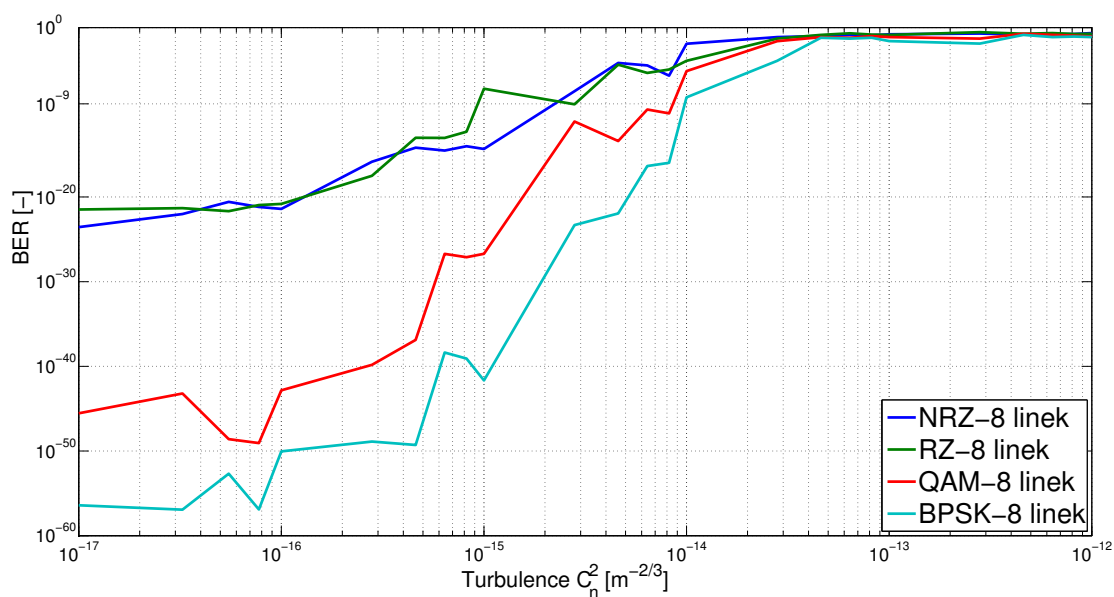
Obrázek 32: Porovnání modulací s 8 vlnovým multiplexu, závislosti BER na změně útlumu.

hodnot bude spoj nepoužitelný pro přenos, neboli nebude možné rozeznat přijímaný signál od šumu.



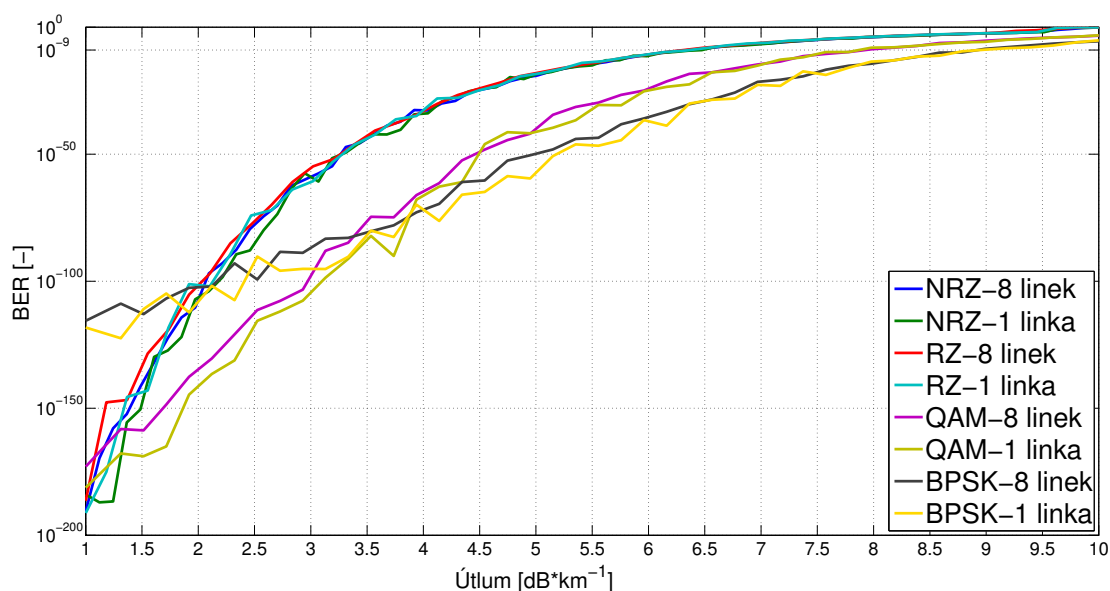
Obrázek 33: Porovnání modulací za použití jedné linky, závislosti BER na změně C_n^2 [$\text{m}^{-\frac{2}{3}}$].

Na následujícím Obr. 35 je srovnání všech modulací použitých na tomto navrhnutém FSO spoji. V grafu jsou taktéž vyneseny křivky za použití jedné samostatné linky a použití 8-vlnového multiplexu. Z grafu lze vypožorovat nejvhodnější modulaci pro reálné nasazení do FSO



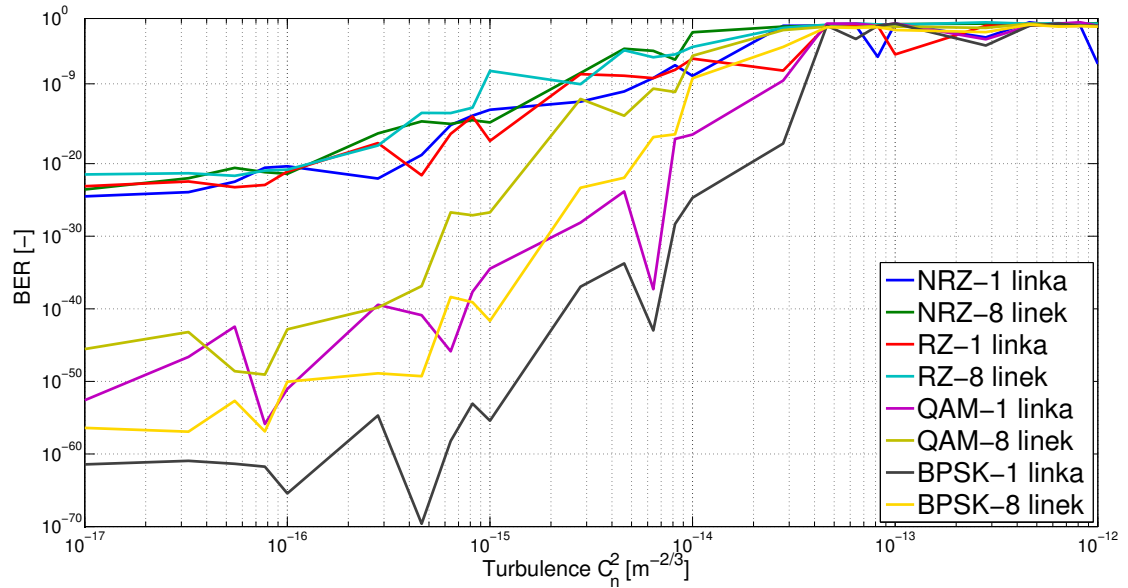
Obrázek 34: Porovnání modulací 8 vlnového multiplexu, závislosti BER na změně $C_n^2 \text{ [m}^{-2/3}]$.

systému s technologií vlnového multiplexu WDM. Jako primární volba by byla modulace BPSK s velkým poměrem velikosti útlumu na bitové chybovosti. Jako druhá nejlepší volba se jeví QAM modulace a v posledním případě modulace NRZ a RZ, které mají téměř totožné výsledky.



Obrázek 35: Graf srovnání všech modulací při změně útlumu na trase.

Obr. 36 porovnává modulace RZ, NRZ, QAM a BPSK při změně velikosti turbulence resp. její změny strukturního parametru indexu lomu C_n^2 . I zde je nejvhodnější volbou pro nasazení do reálného FSO spoje s využitím WDM modulace BPSK, která má nejlepší poměr bitové chybovosti a velikosti turbulentních děl. Čím menší celý tím větší turbulence. Další vhodnou modulací pro kvalitní přenos je QAM a na poslendím místě by bylo použití modulací NRZ a RZ. Při změnách turbulentí jde výrazně vidět v rozdílu použití 8-vlnového multiplexu a samostatné linky, především u modulací QAM a BPSK.



Obrázek 36: Graf srovnání všech modulací při změně strukturního indexu lomu C_n^2 [m^{-2/3}] .

Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala návrhem a následnou simulací pro zavedení technologie vlnového multiplexu na bezvláknový optický spoj, který je provozován mezi VŠB-TU Ostrava a hvězdárnou. Úvod práce se věnuje popisu atmosferických jevů a faktorů působících na FSO systémy. Následně byly zkoumány dva hlavní faktory zhoršení kvality přenosu, a to postupné zvyšování útlumu na trase, čemuž odpovídá zhoršení počasí a výskytu nežadoucích částic, jako jsou prachové nebo aerosolové částice. Druhým faktorem pro nekvalitní přenos dat byla považována atmosferická turbulence, kde teplotní cely způsobovaly změnu strukturního indexu lomu během přenosu.

Pro simulaci byl použit software OptiSystem 13, kde byly hodnoty nastaveny podobné těm, jaké jsou nastaveny na již zmíněném FSO spoji. Hlavními rozdíly byly v použité vlnové délce a vysílacího výkonu. Na tomto reálném spoji je nastavena vlnová délka pro vysílání 850nm, vysílací výkon 80 – 140 mW a přenosová rychlost 1,25 Gbit·s⁻¹. Pro návrh spoje s použitím WDM technologie bylo zapotřebí použít přenosové okno buď to 1310 nm nebo 1550 nm. V této práci resp. návrhu byla využita vlnová délka 1550 nm a vysílací výkon 50 mW.

Byla provedená simulace na základě změny parametru bitové chybovosti pro modulace NRZ, RZ, QAM, BPSK při použití přenosu pomocí jedné vlnové délky oproti použití 8-vlnového multiplexu. Grafy simulací znázorňují závislost změny BER v závislosti na útlumu trasy, tak změny způsobené změnou strukturního indexu lomu C_n^2 . Dalším faktorem byl vliv přenosu informací pomocí jedné samostatné linky a s využitím technologie 8-vlnového multiplexu. Z výsledků provedených simulací bych do reálného provozu zvolil modulaci BPSK. Jako druhou variantu modulaci QAM, a v poslední řadě bych zvolil modulace NRZ nebo RZ. Modulace BPSK dosahuje dobré chybovosti do útlumu na trase 9 db·km⁻¹, modulace QAM do hodnoty 7,8 db·km⁻¹ a pro modulace NRZ a RZ 6,3 db·km⁻¹. Při výskytu turbulencí je opět nejvhodnějším volbou modulace BPSK, kde při použití 8-vlnového multiplexu dosahuje dobré chybovosti do hodnoty $C_n^2=9,5 \cdot 10^{-15} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$. U modulace QAM tomu bude do velikosti $C_n^2=8,5 \cdot 10^{-15} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$, pro NRZ velikost $C_n^2=2,2 \cdot 10^{-15} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$ a RZ pro $C_n^2=9,5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^{-\frac{2}{3}}$. Použití jedné vlnové délky při změně útlumu bude spoj odolnější, ale k znehodnocení spoje dojde ve stejných hodnotách. Zatímco u změny turbulencí bude spoj odolnější a kvalitnější do větších hodnot C_n^2 pro samostatnou linku. Přijatelná bitová chybovost je do hodnoty 10⁻⁹. Při hodnotách vyšších, než je tato, komunikační systém nerozpozná signál od šumu, a spoj nebude vhodný pro přenos informací.

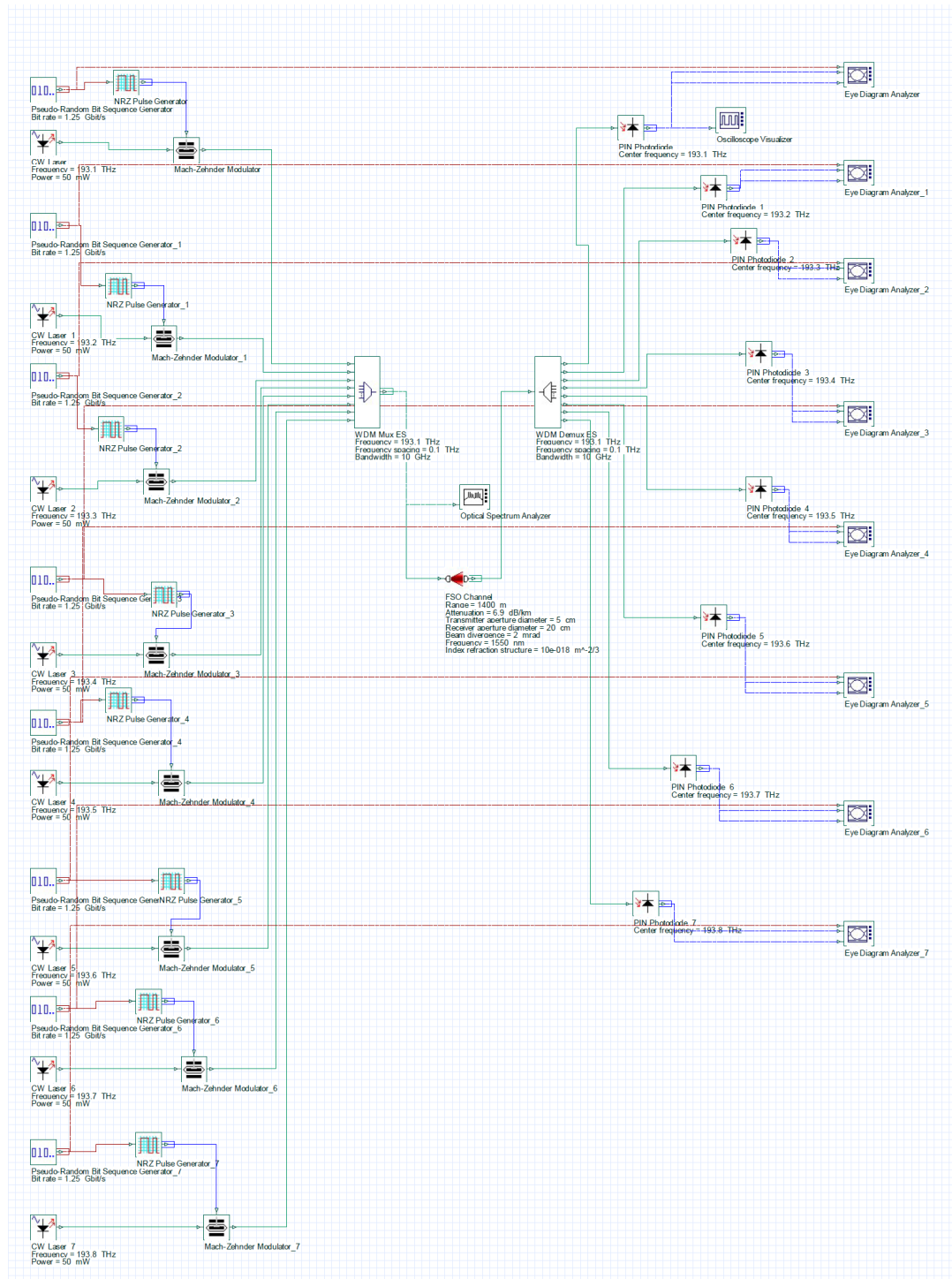
Tyto simulace jsou pouze experimentální a výsledné hodnoty nejspíše nebudou odpovídat těm skutečným. Pro přesné výsledky by bylo zapotřebí nasezení WDM technologie na reálný FSO spoj na VŠB. Tímto by se mohla zabírat následná diplomová práce, která by vycházela z této bakalářské práce.

Literatura

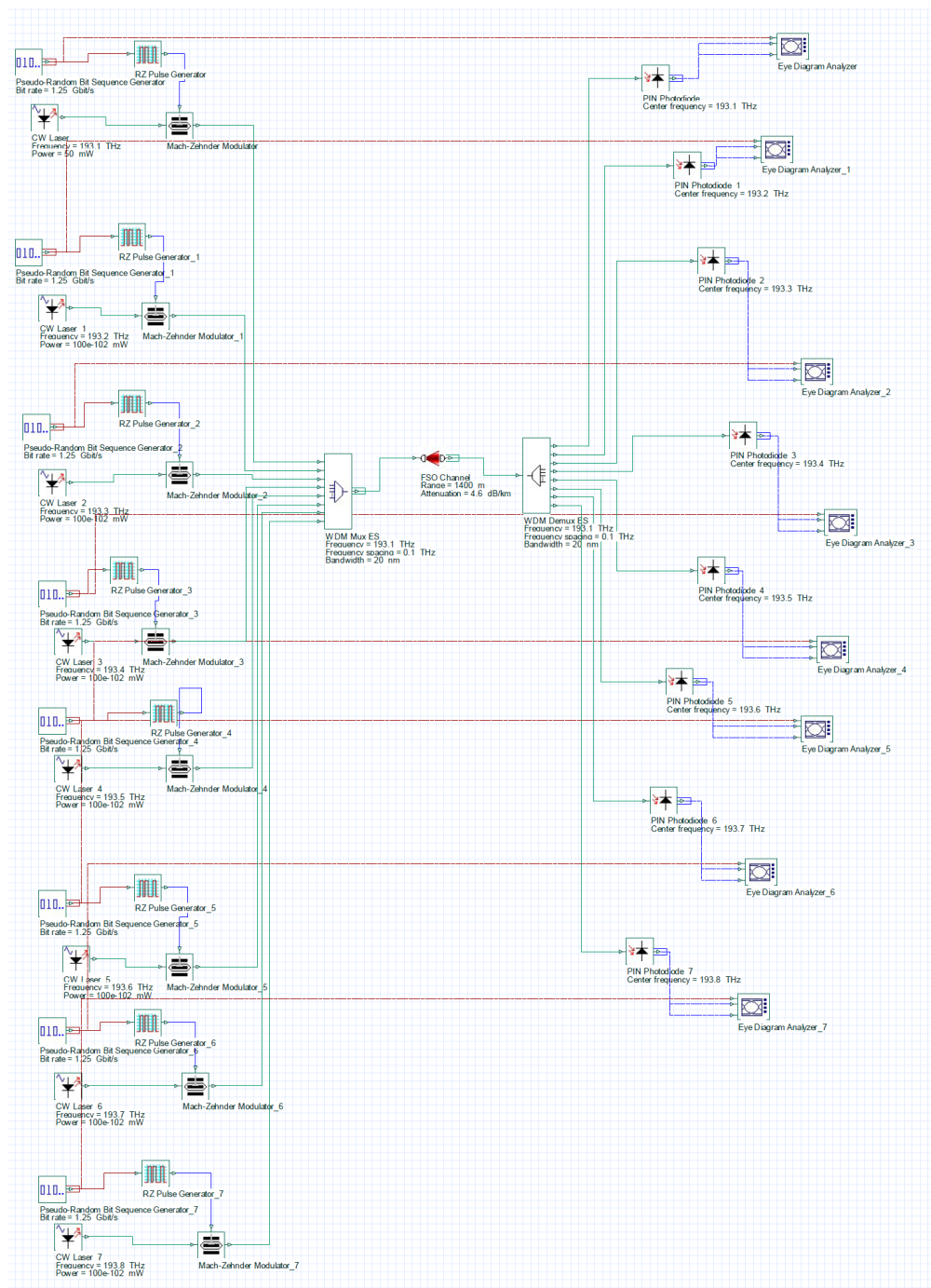
- [1] GHASSEMLOOY, Z., W. POPOOLA a S. RAJBHANDARI. *Optical wireless communications: system and channel modelling with MATLAB*. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2012. ISBN 9781439851883.
- [2] BOUCHET, O. *Free-space optics: propagation and communication*. Newport Beach, CA: ISTE, 2006. ISBN 9781905209026.
- [3] WILLEBRAND, H. a B. S. GHUMAN. *Free space optics: enabling optical connectivity in today's networks*. Indianapolis, Ind.: SAMS, c2002. ISBN 067232248X.
- [4] LAMBERT, S. G. a W. L. CASEY. *Laser communications in space*. Boston: Artech House, c1995. ISBN 0890067228.
- [5] ANDREWS, L. C. a R. L. PHILLIPS. *Laser beam propagation through random media*. 2nd ed. Bellingham, Wash.: SPIE Press, c2005. ISBN 0819459488.
- [6] SALEH, B. E. a M. C. TEICH. *Základy fotoniky*. Vyd. 1. Praha: Matfyzpress, 1996. ISBN 80-85863-12-X.
- [7] ZHENG, J. a H. T. MOUFTAH. *Optical WDM networks: concepts and design principles*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, c2004. ISBN 0471671703.
- [8] KARTALOPOULOS, S. V. *Free space optical networks for ultra-broad band services*. Piscataway, NJ: IEEE Press, c2011. ISBN 0470647752.
- [9] HANZRA, T. S. *Performance of Free Space Optical Communication System with BPSK and QPSK Modulation*. IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering [online]. 2012, 1(3), 38-43 [cit. 2016-04-14]. ISSN 2278-8735. DOI: 10.9790/2834-0133843
- [10] KAUR, A. a R. K. PANCHAL. *Analysis the effect Atmosphere Turbulence in Free - Space Optical (FSO) Communication Systems*. In: International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT) [online]. [May 2014] [cit. 2015-01-30]. Volume 3, Issue 11. ISSN 2277 - 3754. Dostupné z: http://ijeit.com/Vol203/Issue2011/IJEIT1412201405_53.pdf
- [11] *Systémy v submilimetrové a optické oblasti: referáty přednesené na 28. semináři : Praha 11. června 2008*. 1. vyd. Praha: Česká elektrotechnická společnost, Ústřední odborná skupina Mikrovlnná technika, 2008. ISBN 978-80-02-02030-1.
- [12] FILKA, M. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Vyd. 1. Brno: M. Filka, 2009. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [13] BLOOM, S., E. KOREVAAR, J. SCHUSTER a H. WILLEBRAND. *Understanding the performance of free-space optics* [Invited] [online]. 2003, , 23 [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <http://www.fso.wz.cz/Understanding%20the%20performanceFSO.pdf>

- [14] HRANILOVIC, S. *Wireless optical communication systems*. New York: Springer, c2005. ISBN 0387227857.
- [15] ZHENG, J. a H. T. MOUFTAH. *Optical WDM networks: concepts and design principles*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, c2004. ISBN 0471671703.
- [16] ITU-T: G.694.2 - *Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid*. [online], [cit. 2016-04-15]. ITU-T, December 2003. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.2-200312-I/>.
- [17] LAFATA, P. *Pasivní optické sítě WDM-PON*. [online]. 24.5.2009 [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cislocanku=2009050004>
- [18] *Q Factor: The Wrong Answer for Service Providers and NEMs* [online]. 2003, April 25, 2003, 9 [cit. 2016-04-25]. ISSN 5988-8925EN. Dostupné z: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5988-8925EN.pdf>
- [19] S. N. Ahmadyan, C. Gu, S. Natarajan, E. Chiprout and S. Vasudevan, "Fast eye diagram analysis for high-speed CMOS circuits," 2015 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), Grenoble, 2015, pp. 1377-1382. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7092606&isnumber=7092347>

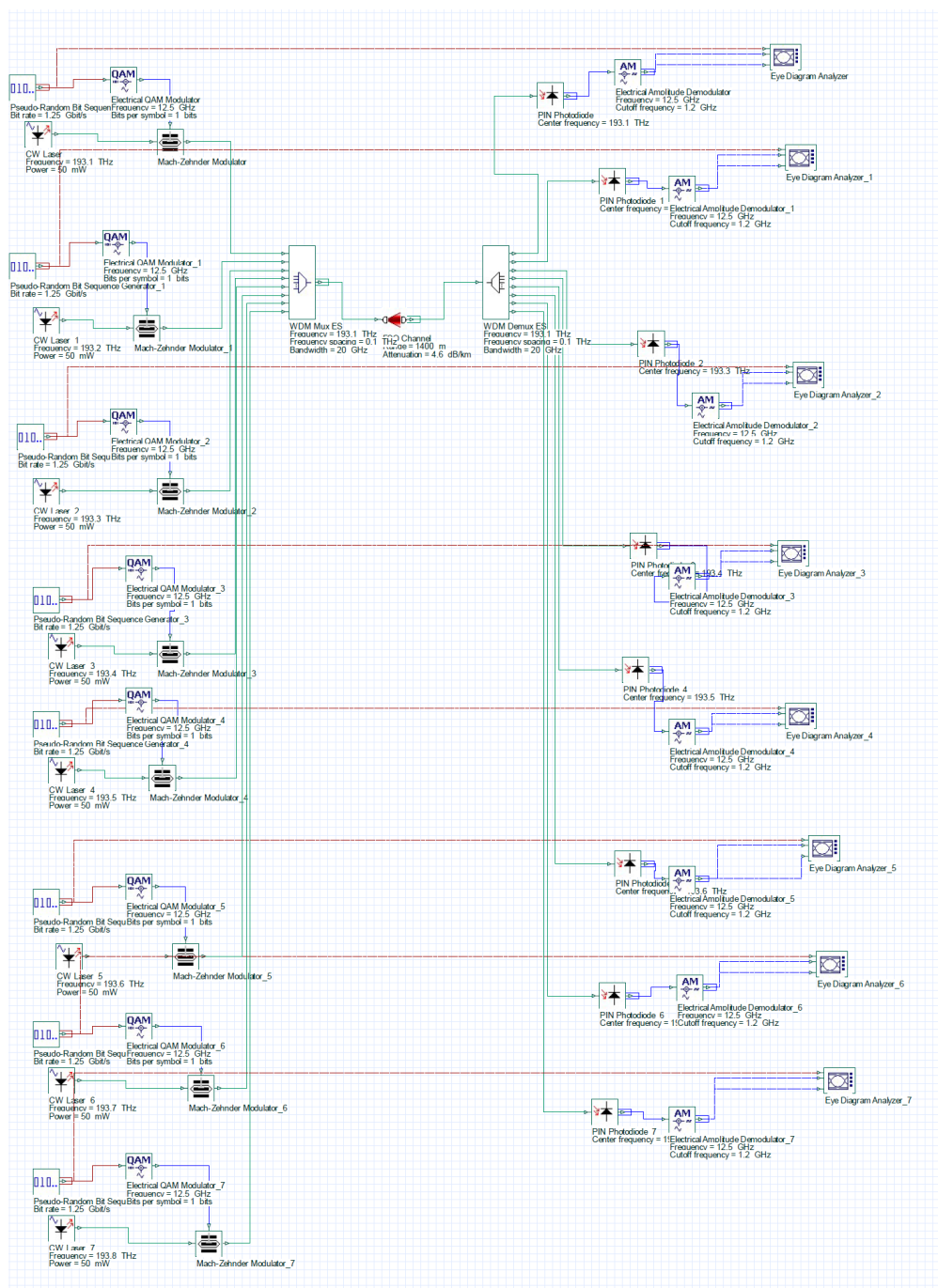
A Přílohy



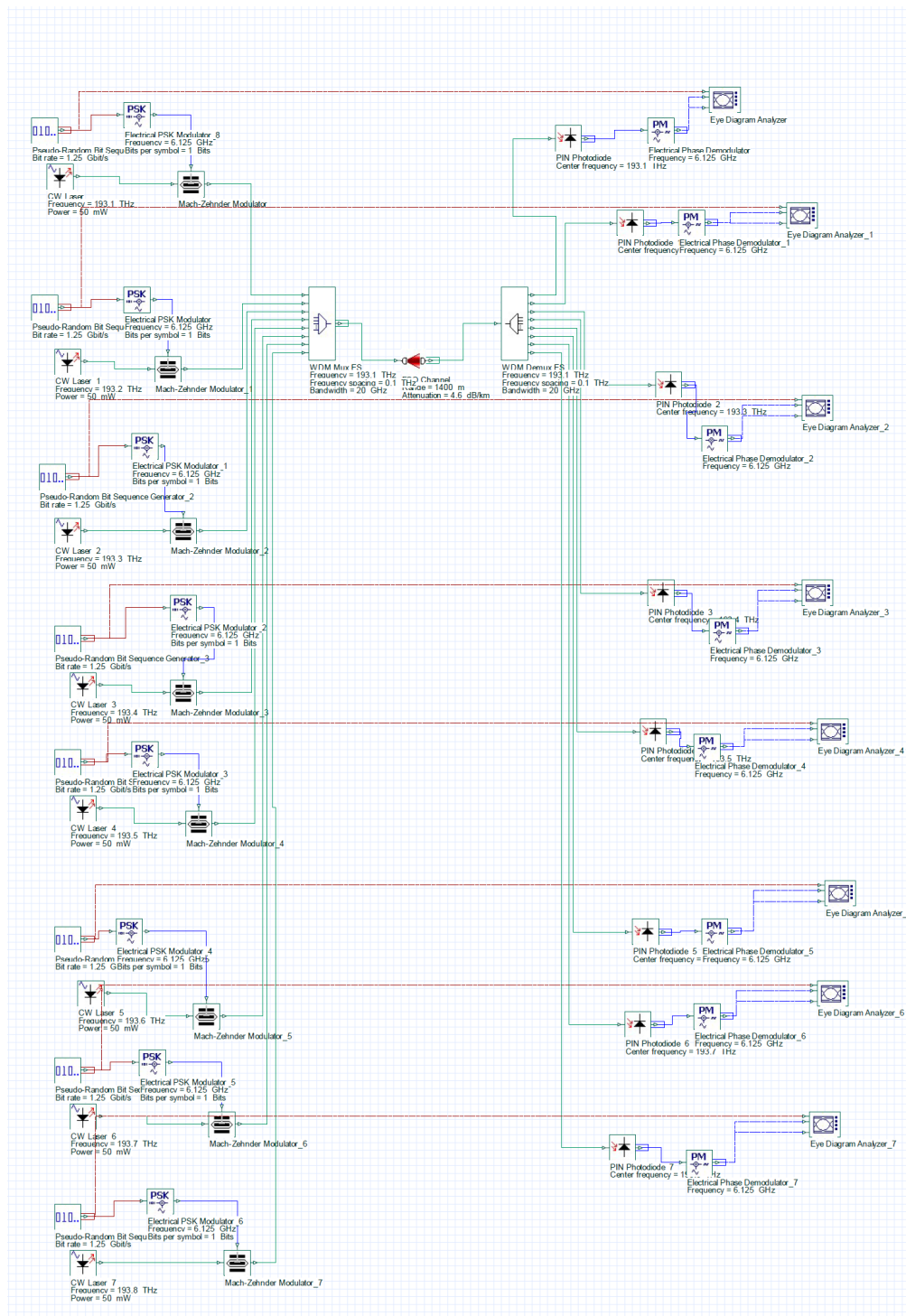
Obrázek 37: Schéma celého zapojení FSO spoje s použitím osmi linek a modulaci NRZ.



Obrázek 38: Schéma celého zapojení FSO spoje s použitím osmi linek a modulaci RZ.



Obrázek 39: Schéma celého zapojení FSO spoje s použitím osmi linek a modulace QAM.



Obrázek 40: Schéma celého zapojení FSO spoje s použitím osmi linek a modulace BPSK.